

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

A MAGYAR
GEOFIZIKUSOK
EGYESÜLETÉNEK
FOLYÓIRATA



JOURNAL OF THE
ASSOCIATION
OF HUNGARIAN
GEOPHYSICISTS

Jubileumi oklevelek átadása a Miskolci Egyetem
Műszaki Földtudományi Karán

EAGE, Barcelona'10
„A New Spring for Geoscience”

A CHAMP mesterséges hold mágneses méréseinek értelmezése
a Pannon-medence és annak környezetében

Mágneses fázisátalakulás és a magnetotellurika

Sorfejtéses inverzió III
Gerjesztett polarizációs adatok inverziós feldolgozása

Hozzászólás Polcz Iván „Egy sekélyrefrakciós szelvény utóélete”
című cikkéhez

Líbiában is jártunk

Földtudományi alapszakos, geofizikus- és környezetgeofizikusmérnök-
hallgatók diplomavédése



MAGYAR GEOFIZIKUSOK
EGYESÜLETE

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

51. évfolyam (2010) 2. szám



A MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETÉNEK FOLYÓIRATA
JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

TARTALOM • CONTENTS

SZERKESZTŐSÉGI ROVAT • EDITORIAL

- 59 Jubileumi oklevelek átadása a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karán (Jubilee Diplomae at Miskolc University) – *Hursán László*

EAGE HÍREK • NEWS OF ASSOCIATION OF EUROPEAN GEOSCIENTISTS AND ENGINEERS

- 62 EAGE, Barcelona'10 „A New Spring for Geoscience” – *Törös Endre*

TANULMÁNYOK • PAPERS

- 64 A CHAMP mesterséges hold mágneses méréseinek értelmezése a Pannon-medence és annak környezetében (Interpretation of the CHAMP magnetic measurements over the Pannonian Basin and its vicinity) – *Kis Károly, Patrick T. Taylor, Wittmann Géza, Toronyi Bence, Pusztai Sándor*
- 73 Mágneses fázisátalakulás és a magnetotellurika (Magnetic phase transition and the magnetotellurics) – *Kiss János, Práczner Ernő, Szarka László, Ádám Antal*
- 88 Sorfejtéses inverzió III – Gerjesztett polarizációs adatok inverziós feldolgozása (Series expansion based inversion III – Procedure for inversion processing of induced polarization (IP) data) – *Turai Endre, Dobróka Mihály, Herczeg Ádám*
- 99 Hozzászólás Polcz Iván „Egy sekélyrefrakciós szelvény utóélete” című cikkéhez (Comment on „Follow-up of a seismic shallow refraction section” by Iván Polcz) – *Szalay István*

EMLÉKEZÉS • RECOLLECTIONS

- 101 Líbiában is jártunk (We have worked in Libya) – *Draskovits Pál, Nemesi László*

HÍREK • NEWS

- 108 Földtudományi alapszakos, geofizikus- és környezetgeofizikusmérnök-hallgatók diplomavédése (Degree day of geophysicists and environmental engineers in Miskolc) – *Pethő Gábor*

IN MEMORIAM

- 110 Steiner Ferenc – *Ormos Tamás*
- 112 Besslénny Klára – *Aczél Etelka*

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

51. évfolyam (2010) 2. szám

A MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETÉNEK FOLYÓIRATA
JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

Főszerkesztő • Editor-in-Chief

DR. BODOKY TAMÁS

E-mail: bodoky@elgi.hu

Szerkesztőbizottság • Editorial Board

DR. BARÁTH ISTVÁN, HEGYBÍRÓ ZSUZSANNA, KAKAS KRISTÓF,

DR. LENKEY LÁSZLÓ, DR. PETHŐ GÁBOR, DR. SZARKA LÁSZLÓ,

VERŐ LÁSZLÓ

Technikai szerkesztő • Technical Editor

HOCK GÁBOR

E-mail: hockg@t-online.hu



Lapunk megjelenését a Magyar Olaj- és Gázipari Nyilvánosan Működő Részvénytársaság támogatja

A szerkesztőség a szakcikkeket (tanulmányokat) szaklektorálás után közli. A szaklektorok névsorát az évvégő számban tesszük közzé. A lapban megjelenő cikkek adatainak és állításainak helyességért, ill. közölhetőségéért kizárólag a szerzők tartoznak felelősséggel.

Kiadja a Magyar Geofizikusok Egyesülete
A kiadásért felel Király András

Szerkesztőség: 1371 Budapest, Pf. 433
Telefon/Fax: (1) 201-9815
Titkársági e-mail: geophysic@mtesz.hu
Honlap: www.mageof.hu

Borító, tipográfia és nyomdai előkészítés:
EP Systema Bt., Budapest

Készült: NestPress Kft., 1116 Budapest, Vegyész u. 17–25.
Felelős vezető: Fekete Iván

Előfizethető a Magyar Geofizikusok Egyesületénél
(1371 Budapest, Pf. 433, Telefon/Fax: (1) 201-9815)
egyesületi tagoknak tagdíj ellenében
Megjelenik évente négyszer

INDEX: 26 507
HU ISSN 0025-0120

Tisztelt Kollégák!

Köszöntjük!

Egyesületünk tagsága és szerkesztőségünk nevében tisztelettel köszöntjük gyémántdiplomás tagtársunkat, *dr. Posgay Károlyt* és aranydiplomás tagtársainkat, *dr. Andrassy Lászlót*, *dr. Baráth Istvánt*, *dr. Holló Lajost*, *Hursán Lászlót* és *Schönviszky Lászlót*.

Bodoky Tamás

Jubileumi oklevelek átadása a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karán

2010. május 15-én ünnepi egyetemi szenátusülésen vas-, gyémánt- és aranyoklevelet adtak át a Bányamérnöki Karon 65, 60 és 50 éve végzett mérnököknek. Az egyetem évtizedek óta nagy súlyt fektetett arra, hogy hagyományaihoz híven, méltóságteljes ünnepségen fejezze ki tiszteletét a szakmai pályájuk befejezésén munkálkodó egykori tanítványainak.

A 2009/10-es tanév a kar jubileumi tanéve volt. 1959 nyarán a kormányzat a Bányamérnöki Kar szaktanszékeit Sopronból Miskolcra költöztette, így az 1959/60-as tanévben végző hallgatók elsőként vehették át okleveleiket a Nehézipari Műszaki Egyetem székhelyén. A jubileumi tanév első eseménye 2009. május 14-én volt Sopronban, ahol az ott utolsóként végző mérnökök vették át aranyoklevelüket (ld. *Magyar Geofizika* 50/3), zárásként 2010. május 14-én a kar szaktanszékei ismertették a miskolci 50 év alatt elért kutatási, oktatási eredményeiket, majd másnap a jubileumi oklevelek átadására került sor.

Az ünnepség kezdetét harangjátékon megszólaló bányász himnusz jelezte, majd Brahms Akadémiai ünnepi nyitányának hangjai mellett, az egyetem és a karok zászlóinak kíséretében vonult be az egyetem rektorából és a hét kar dékánjából álló elnökség.

Dr. Patkó Gyula rektor megnyitójában kiemelte a Műszaki Földtudományi Kar magas szintű kutatási eredményeit, az egyetem légkörét, hangulatát meghatározó szellemiségét, a selmeci hagyományok különleges értékeit, melyek a mai napig áthatják az intézmény életét, majd nagy tisztelettel köszöntötte a jubiláló mérnököket. Ezt követően *Dr. Tihanyi*

László, a Műszaki Földtudományi Kar dékánja beszédében többek között kiemelte a Miskolcon először végző évfolyamnak a selmeci hagyományok újraélesztésében és meggyökereztetésében betöltött szerepét, majd előterjesztésére nyújtották át a 2 vas-, 10 gyémánt- és 48 aranyoklevelet. Egyesületünk tagjai közül *dr. Posgay Károly* okl. bányamérnök gyémántoklevelet, *dr. Andrassy László* okl. geofizikusmérnök, *dr. Baráth István* okl. geofizikusmérnök, *dr. Holló Lajos* okl. geofizikusmérnök, *Hursán László* okl. geofizikusmérnök és *Schönviszky László* okl. geológusmérnök tagtársunk aranyoklevelet vehetett át.

A jubiláló mérnökök nevében Hursán László köszönte meg az oklevelek adományozását és emlékezett vissza az 50 évvel korábbi eseményekre. Elmondta, hogy az évfolyam 1957. szeptemberben azzal a reménnyel kezdte a III. évet Sopronban, hogy tanulmányait ott is fejezi be,



A gyémántdiplomás dr. Posgay Károly



Dr. Andrassy László átveszi aranydiplomáját Dr. Patkó Gyula rektortól és Dr. Tihanyi László dékántól



A jubiláló mérnökök nevében Hursán László megköszöni az oklevelek adományozását

azonban a diákságot is elkeserítő döntés miatt el kellett hagynia az előző két év alatt megszeretett, szabadabb légkörű egyetemet, s a polgári értékeket még őrző várost. Itt is merkedett meg a néhány évvel korábban még üldözött, de Sopronban 1956 után ismét kibontakozni kezdő selmeci ha-

gyományokkal. (Az 50-es évek elején több mint 100 hallgatót zártak ki ezek ápolása miatt!) A végzés előtt álló évfolyam a hagyományokhoz méltóan akart búcsúzni a várostól, az erdészoktatóktól, -hallgatóktól. A tervezett fáklyás szalamandert azonban „a hallgatók kiszámíthatatlan megnyilvánulásai miatt” nem engedélyezték, és csak egy búcsúbál lehetett rendezni.

1959. szeptemberben az évfolyam azzal az elhatározással kezdte az utolsó, a 9. félévét, hogy a soproni szokások szerint búcsúzik az Alma Matertől és a várostól. Jó partnerek voltak a kohászahallgatók, akik szeptemberben megválasztották első miskolci valétabizottságukat, és akikkel számos, Miskolcon korábban nem megszokott rendezvényt szerveztek (szakestélyek, reprezentatív valétabál, a végzősök búcsúzó szalamandere a városban stb.).

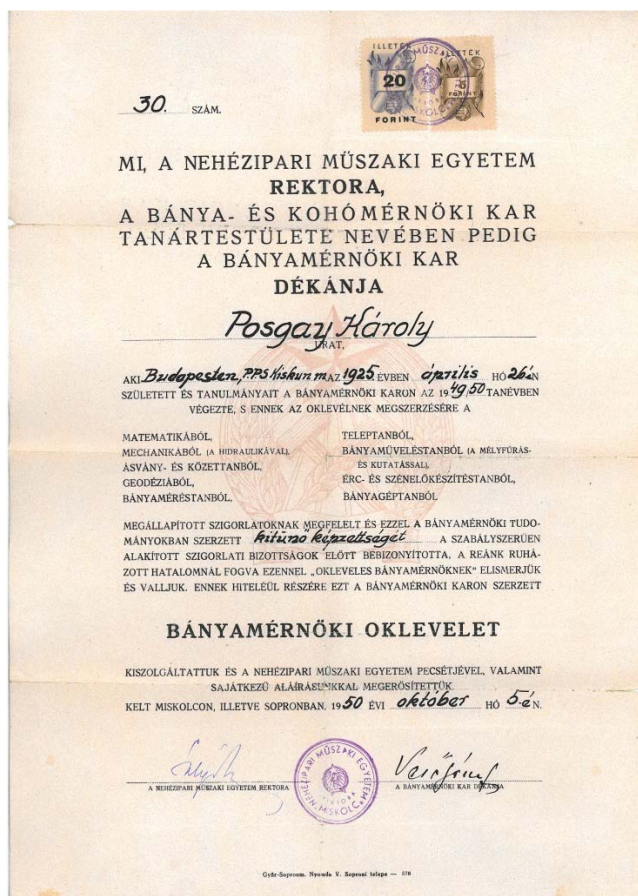
A hagyományok nem maradtak volna fenn az oktatók támogatása nélkül, és ha nincs megfelelő hallgatói fogadó közeg. Különösen az 1960-as évek végén, a Soproni Egyetemmel utóbb felvett szorosabb kapcsolat nyomán erősödött a hagyományápolás.

A jubiláló mérnökök köszönettel tartoznak mindazért, amit az Alma Mater nyújtott számukra. Adott mindenekelőtt tudást és állandó képzetést a tudás megszerzésére, amelyet kamatoztatni lehetett itthon és határainkon túl. Adott emberiséget, szeretetet, segítőkészséget, amelyet jól illusztrált számos személyes élményével. Adott az egyetem térben és időben átívelő összetartozás-érzést, hűségélményt, hűséget a hazához, az Alma Materhez. Különösen hálásak tanáraiknak, akik többségével szoros emberi kapcsolat alakult ki.

Végül a jubiléumok nevében ismételtelen megköszönte a jubileumi oklevelek adományozását.

Ezt követően az egyetem Bartók Béla Zeneművészeti Intézetének tanárai és hallgatói rövid műsorral köszöntötték az ünnepeltek. Az ünnepség a Szózat elénkklésével ért véget, majd az elnökség Beethoven IX. szimfóniája Örömdá-jának hangjaira vonult ki a díszaulából.

Hursán László



Egy gyémánttá nemesült diploma, amelynek értékét egy ma is aktív kutatói életpálya hazai és nemzetközi eredményei teszik hitelessé

Aranydiplomásaink:



Dr. Andrassy László



Dr. Baráth István



Dr. Holló Lajos



Hursán László



Schönviszky László

EAGE, Barcelona'10

„A New Spring for Geoscience”

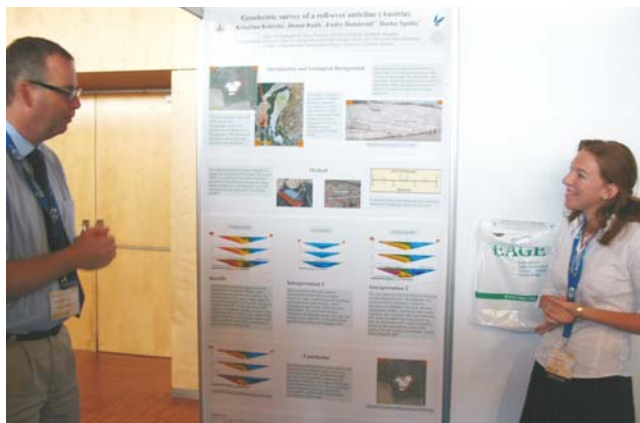
Ez volt a szlogenje az EAGE 72., idei éves kiállításának és konferenciájának Barcelonában. Persze egy szlogen legyen is sokat sejtető, becsalógató, hogy az eseményre minél több résztvevőt vonzzon, mindemellett résztvevők a legkritikább esetben vesznek részt az EAGE (*European Association of Geoscientists & Engineers*) konferenciáján a jól megválasztott szlogen miatt. Akkor miért? Nos, a kiállítók esetében kézenfekvő, hogy termékeiket árulják. Az előadással szereplőknek is többnyire céljuk van tudományos eredményeik bemutatásával még akkor is, ha a közvetlen kereskedelmi célzatú figyelemfelkeltés nem megengedett. Az ötezres létszámú konferencián sokan vannak, akik „csak” a workshopokat és az előadásokat látogatják, és kétségtelen, az EAGE-nek nagy szerepe van abban, hogy a résztvevők szá-

mára lehetővé teszi az elmúlt év szakmai újdonságainak, akár piaci információinak is az „upgrade-elését”. Szándékosan írtam angolul, mert ez így nemcsak egyszerűen megújítást jelent, hanem az újnak az előzőhöz viszonyított minőségileg jobbra fordulását is. Az EAGE teljes taglétszáma jelenleg kb. 15 ezer fő. Kis elhanyagolással tehát majdnem minden harmadik EAGE egyesületi tag elment az idén a katalán fővárosba.

A diákok továbbra is megbecsült tagjai az európai egyesületnek. Ha elfogadott előadással mentek, regisztrációjukat és egyéb költségeiket az EAGE állta. Nekik munkaközvetítő irodákat, diákprogramokat és külön a részükre szervezett szekciókat szerveztek, ahol tudományos eredményeiket bemutathatták. *Kelevitz Krisztina* PhD-hallgatónak (ELTE, Budapest) köszönhetően az idén is volt legalább egy hazai előadónk az EAGE éves konferenciáján.

„Minél jobban, sokoldalúbban szolgálni a folyamatosan növekvő, a geotudományok bármely területéhez tartozó tagságot!” – ez az EAGE folyamatos szlogenje az utóbbi években. Ezért az EAGE-nek nemcsak tagsága, hanem tagegyesületei és egyfajta, a tagság felé kinyújtott kezei ún. „Local Chapter”-ei is vannak, amelyek révén több szolgáltatást képes nyújtani az EAGE. A Magyar Geofizikusok Egyesülete (MGE) 1996-ban vált tagegyesületté, amely tagsági viszonyt megújítandó, a két fél egy dokumentumot írt alá Barcelonában.

Az MGE köztudottan a jövő év októberében szervezi a nemzetközi Balkán Geofizikai Konferenciát (BGS), amelyet az EAGE és amerikai rokonszervezete, az SEG (Society of Exploration Geophysicists) is támogat. Barcelonában sor került a támogatás feltételeinek megbeszélésére mindkét leendő partnerünkkel.



Kelevitz Krisztina előadást tart



A lekösznő és az új elnök az EAGE tisztségviselőinek kíséretében meglátogatta egyesületünk standját



Koccintás a megújult EAGE–MGE kapcsolatokra



Kínából is érdeklődnek a jövő évi BGS konferencia iránt



Barcelona, ahol a villamos is fűvön jár

Egyesületünk standja az idén egy kicsit a BGS-t hirdető standdá vált, a konferencia „megszokott” magyar vonatkozású kiállítói helyett pedig szerencsére újakat is látunk mostanában. *Földes Tamás*, a szolnoki székhelyű Centrál Geo Kft. igazgatója írja önmagukról. A Kft. már negyedik alkalommal vesz részt folyamatosan a rendezvényen. A cég 2003-ban alakult a szénhidrogén ipari geodézia és rekultivációs szakértői szolgáltatások ellátására. Tevékenységét megalakulása óta folyamatosan bővíti a geomérnöki innovatív szolgáltatások és a geotermikus kutatás területén. A Kaposvári Egyetem Diagnosztikai Intézetével közösen lép

fel külföldön a komputertomográf- és micro-CT-magvizsgálatok és szimulációs mérési szolgáltatások területén. Az idei kiállítási anyagukban jelentős hangsúllyal szerepelt a Simsim rezervoár szimulációs szoftver és a 2006-os norvég alapok finanszírozta nyertes pályázatuk anyaga, amely egy többléptékű folyadékáramlás-modellező rendszer kidolgozását tartalmazza repedéses közetekben a geotermális energia kinyeréséhez.

Jövőre újra találkozhatunk: EAGE 2011-ben, Bécsben! Reméljük, többünknek lesz lehetősége ide eljutni, mint volt az idén.

Törös Endre



A Central Geo kiállításai az EAGE történetében

A CHAMP mesterséges hold mágneses méréseinek értelmezése a Pannon-medence és annak környezetében

KIS KÁROLY¹, PATRICK T. TAYLOR², WITTMANN GÉZA³, TORONYI BENCE⁴, PUSZTA SÁNDOR⁵

¹ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, H-1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/c

²Planetary Geodynamics Laboratory, NASA/GFSC, Greenbelt, MD 20771, USA

³MOL Magyar Olaj- és Gázipari Nyrt., H-1117 Budapest, Budafoki út 79.

⁴FÖMI Földmérési és Távérzékelési Intézet, H-1149 Budapest, Bosnyák tér 5.

⁵MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet, Földrengésjelző Obszervatórium, H-1112 Budapest, Meredek u. 18.

A Pannon-medence mély intrakontinentális medence, amely az alpi orogenezis során alakult ki. Az anomáliatérképek készítéséhez a CHAMP mesterséges hold 2008. január 1. és december 31. közötti időszakba eső, gömbhéjban eloszló 165 522 mágneses anomáliaadatai álltak rendelkezésre. Ezek az adatok a Pannon-medencét és annak tágabb környezetét fedik le. Az anomáliaadatokat 324 km magasságú gömbfelületre, $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ kiterjedésű gömbi négyzethálópontjaiba interpoláltuk Gauss-féle súlyfüggvénnyel. A totális mágneses anomáliák vertikális gradiensét szintén meghatároztuk a 324 km magasságú gömb felszínére. A korábbi számításaink során rendelkezésre álltak a mesterséges hold 425 km magasságban mért anomáliaadatai. Ezeknek az anomáliáknak lefelé történő folytatását végeztük el a 324 km magasságú szintre. Az inverziós feladat megoldása a 324 km magasságban mért adatok transzformációját kívánta meg a gömbhöz illesztett síkra. Az inverzió modellje háromszög keresztmetszetű polygonális prizma volt. A minimumfeladat megoldása a *simplex* és a *simulated annealing* módszerekkel történt. A Gauss-eloszlású paraméterek esetében az L_2 , míg a Laplace-eloszlású paraméterek esetében a minimumfeladat megoldása az L_1 norma szerint történt. A jelentős anomáliákat valószínűleg a felső kéreg metamorf kőzeteiben található hemoilmenit ásványok szételegyedése okozza.

Kis, K., Taylor, P. T., Wittmann, G., Toronyi, B., Puszt, S.: Interpretation of the CHAMP magnetic measurements over the Pannonian Basin and its vicinity

The Pannonian Basin is a deep intra-continental basin formed as part of the Alpine orogeny. In order to study the nature of the crustal basement we used the long-wavelength magnetic anomalies acquired by the CHAMP. Some 165 522 data distributed in a spherical shell were available, which were recorded between January 1 and December 31 of 2008. They covered the Pannonian Basin and its vicinity. Those magnetic data were interpolated into a spherical grid of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, at the elevation of 324 km by the Gaussian weight function. The vertical gradient of the total magnetic anomalies were also computed and mapped on the surface of a sphere at 324 km elevation. The former spherical anomaly data at 425 km altitude were downward continued to 324 km. To interpret those data we used an inversion method based on a polygonal prism model. The minimum problem was solved numerically by the simplex and simulated annealing methods. To solve the problem L_2 norm was used in the case of Gaussian distribution parameters and L_1 norm in the case of Laplace distribution parameters. We suppose that the magnetic anomaly is produced by the exsolution of hemo-ilmenite minerals in metamorphic rocks of the upper crust.

Beérkezett: 2010. július 6.; *elfogadva:* 2010. augusztus 27.

Bevezetés

A Pannon-medence mintegy $800 \text{ km} \times 500 \text{ km}$ kiterjedésű. A felső kéreg kőzetei nagy hullámhosszú mágneses anomáliákat hoznak létre. Ezeket a nagyobb kiterjedésű mágneses anomáliákat a mesterséges holdak mérései detektálják.

A CHAMP (*CHAllenging Minisatellite Payload*) német kutatók által kifejlesztett mesterséges holdat közel kör alakú

– $87,3^\circ$ inklinációjú és 456 km kezdeti magasságú – pályára bocsátották 2000. július 15-én (Reigber et al. 2003, 2005). Ez a mesterséges hold mintegy tíz éve regisztrálja a Föld mágneses és gravitációs terét igen megbízható pontossággal. A totális mágneses méréseket a Grenoble-ban, a Laboratoire d'Electronique de Technologie et d'Instrumentation által kifejlesztett skalár magnetométerrel regisztrálják. A totális mágneses tér méréseinek pontossága $\pm 0,5 \text{ nT}$.

A keringési magasság az évek folyamán – a pályamódosítások kivételével – a légkör fékező hatásának következtében csökkent, így a mérések felbontóképessége növekedett. A mágneses mérések időbeli mintavételezése 1 másodperc, amely a 2008. január 1. és december 31. közötti adatokat tekintve mintegy 0,06 fok gömbi távolságnak felel meg. Ebben az időszakban a mesterséges hold 319–340 km magasságtartományban keringett.

A számításokhoz az egész Földre vonatkozó, totális mágneses téranómia adatai álltak rendelkezésünkre mivel a mérési adatokból előzetesen eltávolították a Föld külső magjából származó mágneses teret a CHAOS2 modell (Olsen et al. 2009) alapján. A Gauss-féle sorfejtést az $n = 13$ tagig vették figyelembe. Az adatokat korrigálták a Föld külső eredetű mágneses terének hatásával is.

Interpoláció és koordinátatranszformáció

Számításaink célja a Pannon-medencére és az azt körülvevő területre eső, a 35° – 55° gömbi szélesség és a 10° – 32° gömbi hosszúság intervallumokba tartozó, gömbi négyzetháló pontjaiban lévő anomália-adatsor meghatározása. A 319–340 km magasságú gömbhéjban elhelyezkedő anomáliaadatok a φ gömbi szélesség-, a λ gömbi hosszúság-, valamint az r magasságkoordinátákkal adóttak. Az adatok relatív gyakoriságának szélesség, hosszúság és magasság szerinti eloszlása látható az 1. ábrán.

Ha a relatív gyakoriság eloszlását a gömbi szélesség és hosszúság függvényében ábrázoljuk, akkor megállapítható, hogy közel egyenletesen fedik le a vizsgált területet. Ezeknek az adatoknak az interpolációja történt meg 324 km magasságú és $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ gömbi rácshálóban. A számítások első fázisában azok az adatok interpolációja történt, amelyekhez a $Kp \leq 2$ index tartozott. E szelekció alapján 564 pálya, 165 522 mágneses anomáliaadata állt rendelkezésre.

A háromdimenziós interpolációt a

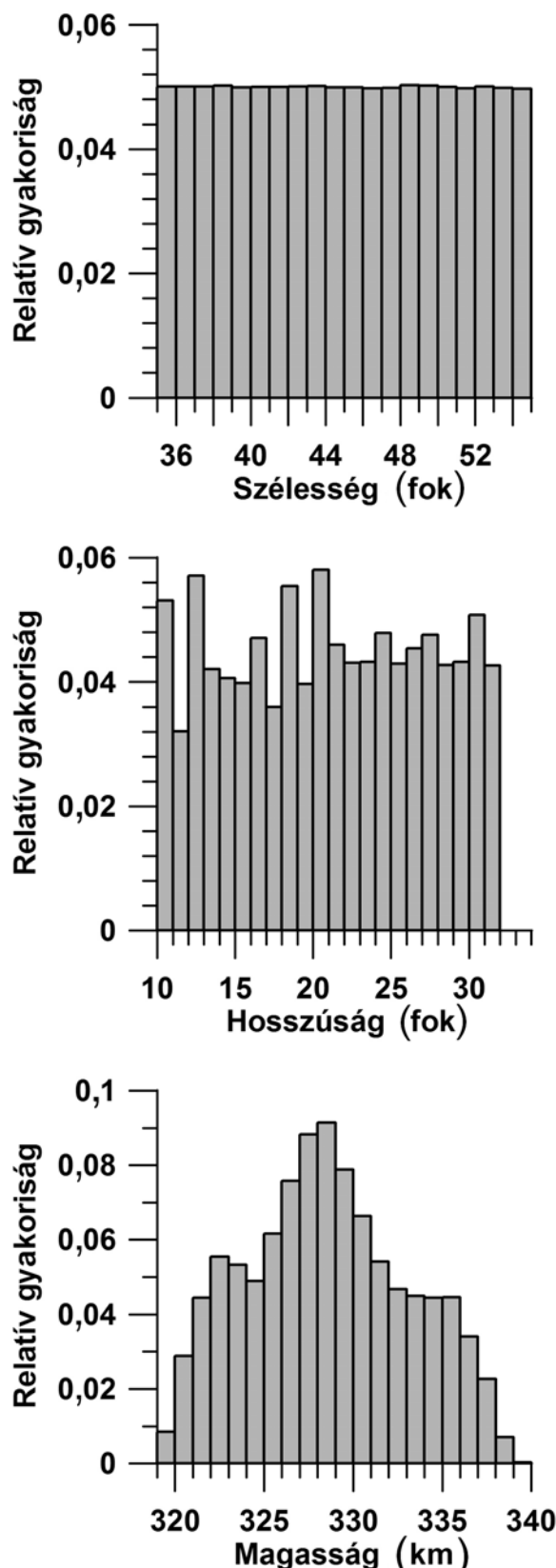
$$w(\Delta_i, k) = \frac{\pi^{3/2}}{k^3} \exp\left(-\frac{\pi^2}{k^2} \Delta_i\right) \quad (1)$$

Gauss-féle súlyfüggvénnyel (Véges 1971; Kis, Wittman 1995; Kis, Wittmann 1998; Kis, Wittmann 2002) hajtottuk végre. Az (1) egyenletben Δ_i jelenti az i -edik mérési hely és a rögzített pont távolságát, k a súlyfüggvény paramétere, amely megszabja a λ_c vágási hullámhosszat, illetve f_c vágási térfrekvenciát:

$$\lambda_c = 1/f_c = 1,69864 k. \quad (2)$$

A súlyfüggvény vágási hullámhosszát a szakirodalomban megjelent javaslatok alapján a -3 dB erősítéssel határoztuk meg, amelynek célszerűségét korábbi vizsgálataink is megerősítették. A kitűzött feladatnak megfelelő vágási hullámhossz az interpoláció során 1000 km volt (laterális irányban a súlyfüggvény kiterjedése 1000 km volt, míg vertikális irányban ez a gömbhéj kiterjedésének felelt meg). Az interpolált rács felszín feletti magassága 324 km.

A meghatározott súlyfüggvény ismeretében az interpolált anomáliaadatokat az alábbi egyenlet határozza meg:



1. ábra A CHAMP adatainak relatív gyakorisága a szélesség, hosszúság és magasság szerinti eloszlásban a Pannon-medence és azt körülvevő tartományában

Figure 1 Relative frequency of the CHAMP magnetic data versus latitude, longitude and altitude over the Pannonian Basin and its vicinity

$$T^{\text{interpolált}} = \left(\sum_{i=1}^n w_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^n T_i w_i, \quad (3)$$

ahol n jelenti a figyelembe vett adatok számát, T_i az i -edik anomáliaadatot, és w_i a hozzá tartozó súlyfüggvény értékét jelöli.

Az interpolálás előtt az átlagtól lényegesen eltérő, zavart adatokat az alfa-trim módszerrel eltávolítottuk. Feltételezve az adatok normális eloszlását, a hibafüggvény felhasználásával meghatároztuk az átlaganomáliához viszonyított 75%-os maximális megengedett eltérést, így az adatok 25%-a az interpolációs eljárásból kimaradt. A vizsgálatok alapján az előzetesen megválasztott $Kp \leq 2+$ követelményt tovább szigorítottuk, és csak azokat az adatokat használtuk fel, amelyekhez a $Kp \leq 1$ index tartozik. Így, 107927 mérési adatból határoztuk meg az interpolált értékeket. A kapott eredményeken további 3×3 pontos simítást alkalmazunk. A CHAMP mágneses méréseinek interpolációval meghatározott anomáliatérképe a 2. ábrán látható.

Az interpolált adatok gömb felületén, gömbi polárkoordináta-rendszerben álltak rendelkezésre. A tanulmányba foglalt számításokat rendszerint xyz derékszögű koordináta-rendszerben kellett elvégezni. Ezen okból a 324 km magasságban elhelyezkedő gömbi adatokat, a gömb $\varphi = 47^\circ$ és $\lambda = 21^\circ$ pontjában elhelyezett érintő síkba transzformáltuk (Kis et al. 2006). A transzformáció végrehajtása egy translációval és egy rotációval oldható meg. A mesterséges hold mérési pontja legyen r, θ, λ , ahol r a Föld középpontjától mért távolság, θ és λ a mérési hely pólustávolsága és gömbi hossz-

szúsága. Helyezzük az XYZ koordináta-rendszer origóját a Föld középpontjába, az X tengely legyen az Egyenlítő síkjában és mutasson a greenwichi meridián irányába, a Z tengely a Föld forgástengelyének irányával essen egybe és mutasson kifelé, az Egyenlítő síkjában lévő Y tengely legyen merőleges az XZ síkra! Ekkor a mérési hely koordinátái:

$$X = r \sin \theta \cos \lambda, \quad Y = r \sin \theta \sin \lambda, \quad Z = r \cos \theta. \quad (4)$$

Rögzítsük az xyz derékszögű koordináta-rendszer origóját az r_0, θ_0 és λ_0 koordinátájú pontban ($r_0 = a$ Föld sugara + 324 km; $\theta_0 = 43^\circ$ és $\lambda_0 = 21^\circ$)! Így

$$t_x = r_0 \sin \theta_0 \cos \lambda_0, \quad t_y = r_0 \sin \theta_0 \sin \lambda_0, \quad t_z = r_0 \cos \theta_0. \quad (5)$$

A translációt az

$$x' = X - t_x, \quad y' = Y - t_y, \quad z' = Z - t_z \quad (6)$$

egyenletek adják meg. Mutasson az x tengely az északi, az y tengely keleti irányba, míg a z tengely függőlegesen lefelé! A rotáció egyenletei:

$$\begin{aligned} x &= -x' \cos \theta_0 \cos \lambda_0 - y' \cos \theta_0 \sin \lambda_0 + z' \sin \theta_0, \\ y &= -x' \sin \lambda_0 - y' \cos \lambda_0, \\ z &= -x' \sin \theta_0 \cos \lambda_0 - y' \sin \theta_0 \sin \lambda_0 + z' \cos \theta_0. \end{aligned} \quad (7)$$

Ezzel a translációval és rotációval tudjuk a mérési adatokat a derékszögű xyz koordináta-rendszerbe transzformálni. Ez a transzformáció az inverzió során felhasznált adatok esetében az adatrendszer szélén mintegy 10 km-es magasságtérítést okozott. Ezt a mennyiséget mint teoretikus hibát vettük figyelembe az inverz feladat megoldása során.

Vertikális gradiens

A mágneses anomáliatérképek vertikális gradiense kvalitatív értelmezésre is lehetőséget nyújt, elsősorban a ható horizontális kiterjedését mutatja. A totális mágneses anomáliák vertikális gradiensének meghatározása lineáris transzformációnak tekinthető, és az

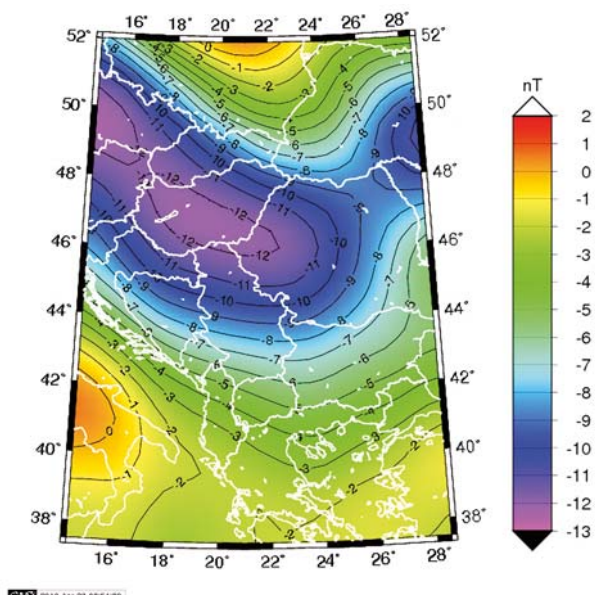
$$S(f_x, f_y) = 2\pi (f_x^2 + f_y^2)^{1/2} \quad (8)$$

átviteli függvénnyel jellemezhető, ahol f_x és f_y az x és y tengelyek irányába mutató térfrekvenciákat jelentik (Blakely 1995). Az előbbi átviteli függvény erősíti a nagyobb térfrekvenciák tartományát, ezért ablakfüggvény alkalmazása célszerű. Az alkalmazott Gauss-féle aluláteresztő ablakfüggvény az

$$S_{LP}(f_x, f_y) = \exp \{-k^2(f_x^2 + f_y^2)\} \quad (9)$$

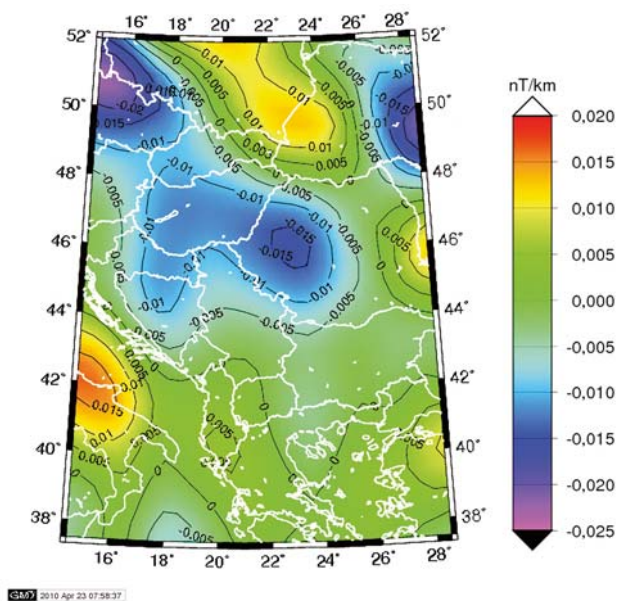
átviteli függvénnyel rendelkezik, ahol a k paraméter megfelelő megválasztása az átengedett térfrekvencia-tartományt határozza meg. A csontított vertikális gradiensképzés súlyfüggvénye:

$$\begin{aligned} s(x, y) &= \frac{\pi^{5/2}}{k^3} \exp \left\{ -\frac{\pi^2(x^2 + y^2)}{k^2} \right\} \\ &\times M \left(-\frac{1}{2}, 1, \left(\frac{\pi^2(x^2 + y^2)}{k^2} \right) \right), \end{aligned} \quad (10)$$



2. ábra A CHAMP mágneses méréseinek interpolációval meghatározott anomáliatérképe a Pannon-medence és az azt körülvevő tartomány területére, Albers-féle vetületben, 324 km magasságban (az anomáliaértékeket nT egységben ábrázoltuk)

Figure 2 The CHAMP total magnetic anomaly map determined by interpolation over the Pannonian Basin region, plotted on Albers' projection at 324 km altitude (anomalies are plotted in nT units, in 22 grades color levels and a contour interval of 1 nT)



3. ábra A CHAMP totális mágneses anomáliaeloszlásának vertikális gradiense a Pannon-medence és az azt körülvevő tartomány területére, Albers-féle vetületben, 324 km-es magasságban ábrázolva (az anomáliákat nT/km egységben ábrázoltuk)

Figure 3 The vertical gradient of the CHAMP total magnetic anomaly map over the Pannonian Basin region, plotted on Albers' projection at an altitude of 324 km (anomalies are plotted in nT/km units, in 14 color grades levels and a contour interval of 0.005 nT/km)

ahol M a konfluens hipergeometrikus függvényt jelenti. A számítások részletei megtalálhatók Kis, Pusztai (2006) dolgozatában. A korábban bemutatott, 324 km magasságban meghatározott totális mágneses anomáliák vertikális gradiense a 3. ábrán látható. A vertikális gradiensanómia minimuma Erdély területén található, az anomália nagyjából lefedti a Pannon-medencét (3. ábra). A vertikális gradiensanómia közelítőleg kijelöli az inverz feladat során használt modell horizontális kiterjedését.

Analitikai lefelé folytatás

A potenciáterek lefelé történő folytatására különböző, rendszerint közelítő módszereket fejlesztettek ki. A mágneses anomáliák lefelé folytatását térfrekvencia-tartományban a

$$T_{\text{lefelé}}(f_x, f_y) = T_0(f_x, f_y) \exp \{2\pi h (f_x^2 + f_y^2)^{1/2}\} \quad (11)$$

egyenlet írja le, ahol $T_{\text{lefelé}}(f_x, f_y)$ a lefelé folytatott mágneses anomáliát, $T_0(f_x, f_y)$ a kiinduló mágneses anomáliát, h a lefelé folytatás mélységét jelentik. Az előző egyenlet inverz Fourier-transzformáltja numerikus módszerrel, ablakfüggvények felhasználásával válik meghatározhatóvá. Bullard, Cooper (1948) az

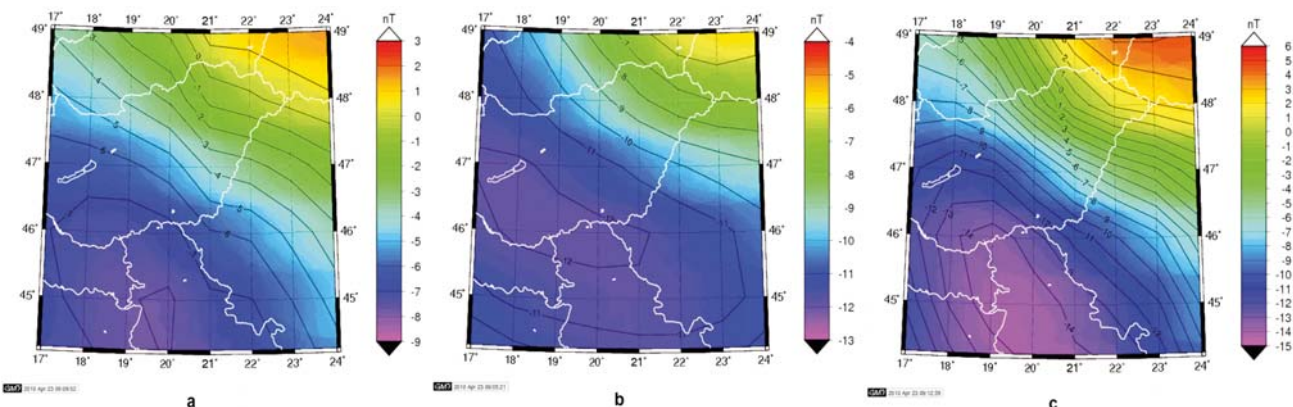
$$\exp \{-4\pi^2 \gamma (f_x^2 + f_y^2)\} \quad (12)$$

ablakfüggvény felhasználását javasolják, amelyben γ értéke a lefelé folytatás mélységétől függ. Clarke (1969) a lefelé folytatást optimumszűrőként fogalmazta meg, De Meyer (1974) a Weierstrass- és a Fejér-ablakfüggvények alkalmazását javasolta. Meskó (1984) a lefelé folytatás numerikus közelítő megoldására az alábbi módosított átviteli függvény használatát javasolta:

$$S_{\text{lefelé}}(f_x, f_y) = \exp(2\pi h f_r), \quad \text{ha } f_r \leq f_{rc}, \\ = \exp(2\pi h f_r - \gamma(f_r - f_{rc})^2), \quad \text{ha } f_r > f_{rc}, \quad (13)$$

ahol f_r a radiális térfrekvencia, γ célszerű értéke a folytatás mélységétől függ.

Számításainkhoz rendelkezésre álltak a CHAMP totális mágneses anomáliái a 425 km és 324 km felszín feletti magasságban. Célszerűnek mutatkozott a mérési adatoknak a 425 km magasságról a 324 km magasságra történő lefelé folytatása. A lefelé folytatás a Meskó (1984) által javasolt módszerrel történt. A 41,3 km-es átlagos mintavételi távolság esetében a lefelé folytatás mélysége 2,44 mintavételi távolságegység. A 4. ábrán a 425 km és a 324 km magasságokban meghatározott anomáliatérképek, illetve a 324 km-es magasságban lefelé folytatott anomáliatérkép látható. Az eltérést valószínűleg azok az ionoszférikus áramok okozzák, amelyeknek hatását a Kp index



4. ábra A CHAMP mérési adataiból meghatározott mágneses anomáliatérkép 425 km magasságban (a), 324 km magasságban (b), illetve a 425 km magasságból 324 km (c) magasságra lefelé folytatással számított mágneses anomáliatérkép a Pannon-medence tartományában, a térképek Albers-féle vetületben vannak ábrázolva (az anomáliák nT egységben ábrázolva)

Figure 4 The CHAMP magnetic anomaly maps: (a) at 425 km and (b) at 324 km elevations, (c) downward continued magnetic anomaly map computed from 425 km to 324 km elevation, the maps are plotted on Albers' projection, in color scale units of nT

figyelembevételével végzett korrekció nem eliminálta teljes mértékben. További eltérést okozhat a komplex mágneses ható nem azonos mélységű elhelyezkedése, amely a vizsgált terület északkeleti részén jelent nagyobb amplitúdójú anomáliát.

Mágneses direkt feladat

A mágneses inverz feladat megoldásának alapeleme a tér jellegzetességét leíró modell kiválasztása. A mágneses direkt feladat megoldására a Plouff (1976) által megadott, poligonális prizma totális mágneses terét leíró modellt választottunk. A modell vízszintes fedő- és alaplappal rendelkezik, amelyeknek mélysége z_T , illetve z_B . Horizontálisan egy poligon határolja, k -dik csúcspontjának koordinátái x_k és y_k . A totális mágneses tér három összetevőjét a

$$\begin{aligned} T_x &= (\mu_0/4\pi)(J_x V_1 + J_y V_2 + J_z V_3), \\ T_y &= (\mu_0/4\pi)(J_x V_2 + J_y V_4 + J_z V_5), \\ T_z &= (\mu_0/4\pi)(J_x V_3 + J_y V_5 + J_z V_6) \end{aligned} \quad (14)$$

egyenletek adják meg, ahol J_x , J_y és J_z a ható mágnesezettségének komponensei, V_1, V_2, \dots, V_6 a ható térfogatára vonatkozó numerikus integrálások eredményét tartalmazza. A totális mágneses teret az alábbi egyenlet adja meg:

$$T = (\mu_0/4\pi)[J_x(lV_1 + mV_2 + nV_3) + J_y(lV_2 + mV_4 + nV_5) + J_z(lV_3 + mV_5 + nV_6)], \quad (15)$$

ahol

$$l = \cos I \cos D, \quad m = \cos I \sin D, \quad n = \sin I.$$

Az egyenletekben I és D a földi mágneses tér inklinációját és deklinációját jelentik.

Inverzió Bayes-féle módszerrel

A ható paramétereinek becslése a potenciálméleti inverz feladat megoldásának egyik hatékony módszere Bayes tételén (Bayes 1763) alapul, amely az \mathbf{m} paramétereknek és a \mathbf{d} mérési adatok vektorának mint valószínűségi változók közötti összefüggését mondja ki:

$$p(\mathbf{m}|\mathbf{d}) = [p(\mathbf{d}|\mathbf{m}) p(\mathbf{m})]/p(\mathbf{d}), \quad (16)$$

ahol $p(\mathbf{m}|\mathbf{d})$ a modell paramétereinek a mérési adatokra vonatkozó feltételes valószínűségi sűrűségfüggvénye, $p(\mathbf{d}|\mathbf{m})$ a mérési adatoknak a modellparaméterekre vonatkozó feltételes valószínűségi sűrűségfüggvénye, $p(\mathbf{m})$ a modellparaméterek valószínűségi sűrűségfüggvénye, továbbá $p(\mathbf{d})$ a mérési adatok valószínűségi sűrűségfüggvénye. A számítások során a mérési adatok sűrűségfüggvénye állandónak tekinthető, és így a Bayes-tétel a

$$p(\mathbf{m}|\mathbf{d}) = p(\mathbf{d}|\mathbf{m}) p(\mathbf{m}) \quad (17)$$

formában alkalmazható. A $p(\mathbf{m})$ -et *a priori*, a $p(\mathbf{d}|\mathbf{m})$ -et *likelihood*, míg $p(\mathbf{m}|\mathbf{d})$ -t *a posteriori* valószínűségi sűrűségfüggvénynek nevezik. A Bayes-féle módszert Box, Tiao (1973), Tarantola (1987), Duijndam (1988a, 1988b), Menke (1989) és Sen, Stoffa (1995) munkái ismertetik.

Az *a posteriori* valószínűségi sűrűségfüggvény Gauss-féle eloszlás esetében:

$$\begin{aligned} p^{a \text{ posteriori}} &\propto \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{m} - \mathbf{m}^{a \text{ priori}})^T \mathbf{C}_m^{-1}(\mathbf{m} - \mathbf{m}^{a \text{ priori}})\right\} \\ &\times \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{d}^{\text{mért}}(x, y) - T^{\text{számított}}(x, y, \mathbf{m}))^T \right. \\ &\quad \left. \times \mathbf{C}_D^{-1}(\mathbf{d}^{\text{mért}}(x, y) - T^{\text{számított}}(x, y, \mathbf{m}))\right\}, \end{aligned} \quad (18)$$

illetve Laplace-féle eloszlás esetében:

$$\begin{aligned} p^{a \text{ posteriori}} &\propto \exp\left\{-\frac{|\mathbf{m} - \mathbf{m}^{a \text{ priori}}|}{\mathbf{C}_m^{1/2}}\right\} \\ &\times \exp\left\{-\frac{|\mathbf{d}^{\text{mért}}(x, y) - T^{\text{számított}}(x, y, \mathbf{m})|}{\mathbf{C}_D^{1/2}}\right\}, \end{aligned} \quad (19)$$

ahol a $T^{\text{számított}}$ a direkt feladat megoldásából adódik. Mindkét *a posteriori* eloszlásnak ott van maximuma, ahol a kitevőkben szereplő függvények minimummal rendelkeznek.

A \mathbf{C}_m az *a priori* adatok kovarianciamátrixa, amely a

$$\mathbf{C}_m = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1 \sigma_2 \rho_{12} & \cdots & \sigma_1 \sigma_M \rho_{1M} \\ \sigma_2 \sigma_1 \rho_{21} & \sigma_2^2 & \cdots & \sigma_2 \sigma_M \rho_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_M \sigma_1 \rho_{M1} & \cdots & \cdots & \sigma_M^2 \end{bmatrix}$$

formában írható. $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M$ az *a priori* adatok szórását, míg $\rho_{12}, \rho_{13}, \dots, \rho_{1M}$ az egyes paraméterek közötti korrelációt jelentik, az előző mátrixban a szórások az *a priori* bizonytalanságot fejezik ki. A (18) és (19) egyenletekben szereplő \mathbf{C}_D kovarianciamátrix két részből áll, a mérési adatok \mathbf{C}_d és az elméleti hiba \mathbf{C}_T kovarianciamátrixának összegéből tevődik össze:

$$\mathbf{C}_D = \mathbf{C}_d + \mathbf{C}_T. \quad (20)$$

A becsült paraméterek kovarianciamátrixát a

$$\mathbf{C}'_m \approx (\mathcal{G}_n^T \mathbf{C}_D^{-1} \mathcal{G}_n + \mathbf{C}_m^{-1})^{-1} \quad (21)$$

összefüggés adja meg, ahol a \mathcal{G}_n mátrixot az alábbi egyenlet szolgáltatja

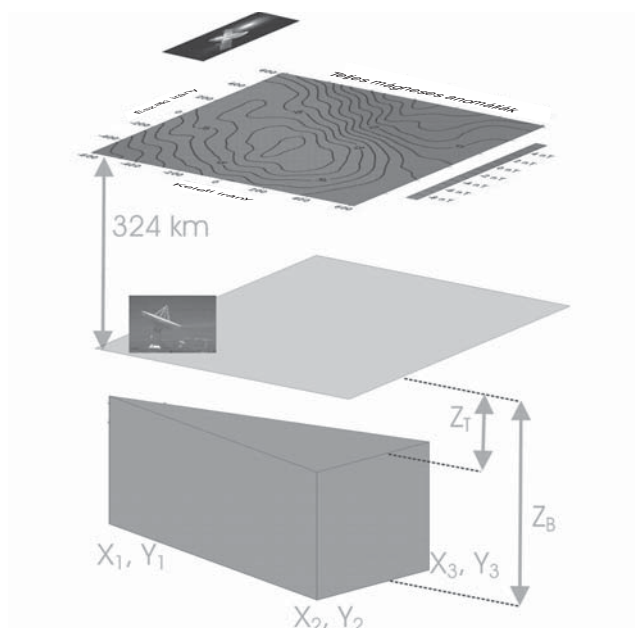
$$\mathcal{G}_n = \left(\frac{\partial T}{\partial \mathbf{m}} \right)_{\mathbf{m} = \mathbf{m}_e}. \quad (22)$$

(Tarantola 1987).

A minimumfeladat megoldása szolgáltatja az ismeretlen paraméterek becsült értékeit. Ekkor elegendő a kitevőkben szereplő mennyiségek összegének a minimumát meghatározni numerikus módszerrel az \mathbf{m} paraméterek vektorának függvényében.

Inverz feladat megoldása

Korábbi számításaink során különböző modelleket vizsgáltunk meg kvalitatív (Taylor et al. 2005) és kvantitatív (Kis et al. 2006) eljárásokkal. Számításaink során a Plouff (1976) által megadott háromszög keresztmetszetű hatót választottunk, így három koordinátapár, (x_1, y_1) , (x_2, y_2) és (x_3, y_3) adja meg a csúcspontok helyzetét, a tető- és a talpmélységet a z_T és z_B paraméterek jelölik. A választott modell egy ÉNy-i irányból kinyúló háromszög (5. ábra). A hatóra az $I = 60^\circ$, $D = 0^\circ$ szögekkel rögzített indukált, illetve $\alpha = 60^\circ$, $\beta = 60^\circ$ irányú remanenes mágnesezettséget fogadtunk el, amelyek értéke $-1,5$ A/m.



5. ábra A vízszintes z_T mélységű alap- és z_B mélységű fedőlapokkal határolt és három koordinátapárral, (x_1, y_1) , (x_2, y_2) és (x_3, y_3) -mal rögzített, háromszög keresztmetszetű mágneses ható modellje, amelyet az inverz feladat megoldása során alkalmaztunk

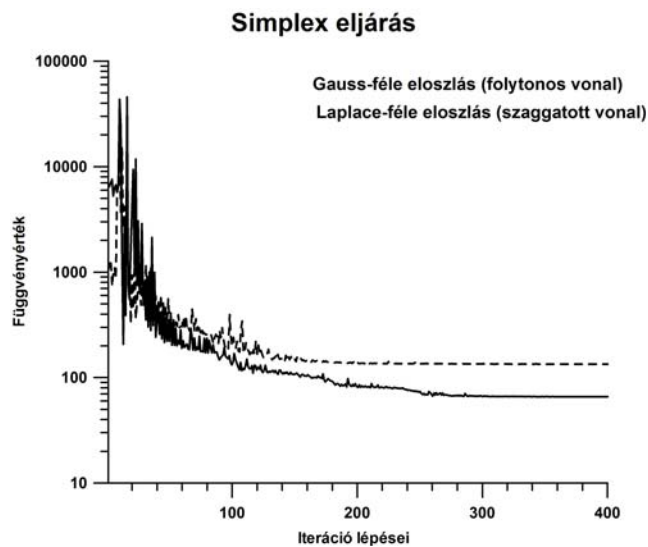
Figure 5 The three-dimensional triangular model of the magnetic source body used in the inverse problem, its upper and lower depths are indicated by z_T and z_B , respectively, the triangular base is given by three coordinate pairs, (x_1, y_1) , (x_2, y_2) and (x_3, y_3)

A minimumfeladat numerikus meghatározása a Walsh (1975) által ismertetett *simplex* módszerrel, illetve a Kirkpatrick et al. (1983), Sen, Stoffa (1995) által összefoglalt *simulated annealing* eljárással történt.

1. táblázat *Simplex* és *simulated annealing* módszerrel meghatározott modellparaméterek Laplace- és Gauss-eloszlások esetében

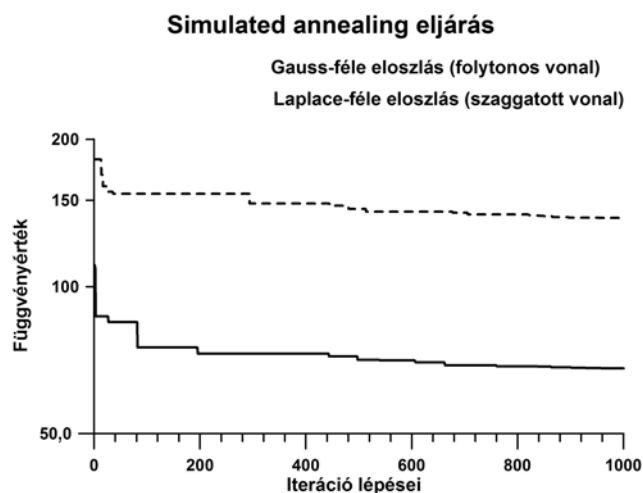
	Laplace-eloszlás (km)	Gauss-eloszlás (km)
<i>Simplex</i> módszer Paraméterek	$x_1 = 954 \pm 42$	$x_1 = 549 \pm 42$
	$x_2 = -360 \pm 42$	$x_2 = -338 \pm 42$
	$x_3 = 9 \pm 42$	$x_3 = 54 \pm 42$
	$y_1 = -949 \pm 42$	$y_1 = -941 \pm 42$
	$y_2 = -216 \pm 42$	$y_2 = 105 \pm 42$
	$y_3 = 960 \pm 42$	$y_3 = 966 \pm 42$
	$z_T = 11 \pm 8$	$z_T = 5 \pm 8$
	$z_B = 22 \pm 10,5$	$z_B = 21 \pm 10,5$
<i>Simulated annealing</i> módszer Paraméterek	$x_1 = 932 \pm 42$	$x_1 = 536 \pm 42$
	$x_2 = -357 \pm 42$	$x_2 = -341 \pm 42$
	$x_3 = 13 \pm 42$	$x_3 = 54 \pm 42$
	$y_1 = -950 \pm 42$	$y_1 = -945 \pm 42$
	$y_2 = -206 \pm 42$	$y_2 = 162 \pm 42$
	$y_3 = 960 \pm 42$	$y_3 = 966 \pm 42$
	$z_T = 4 \pm 8$	$z_T = 7 \pm 8$
	$z_B = 16 \pm 10,5$	$z_B = 23 \pm 10,5$

A minimumfeladat megoldása során a paramétereket korrelálatlanak tekintettük, az *a priori* szórásokat azonos értékűnek, 5 nT-nak tekintettük, míg a mérési adatok szórását 2,5 nT értékben adtuk meg. Mind a *simplex*, mind a *simulated annealing* módszerrel megbecsültük a modellül választott ható nyolc paraméterét Gauss-féle és Laplace-féle paramétereloszlások esetében. A Gauss-féle paramétereloszlás esetében az L_2 norma szerint, míg a Laplace-féle eloszlás esetében a minimumfeladat megoldása az L_1 norma szerint történt. A számítások eredményét az 1. táblázat tartalmazza. A 6. és 7. ábra logaritmikus skálán mutatja a mi-



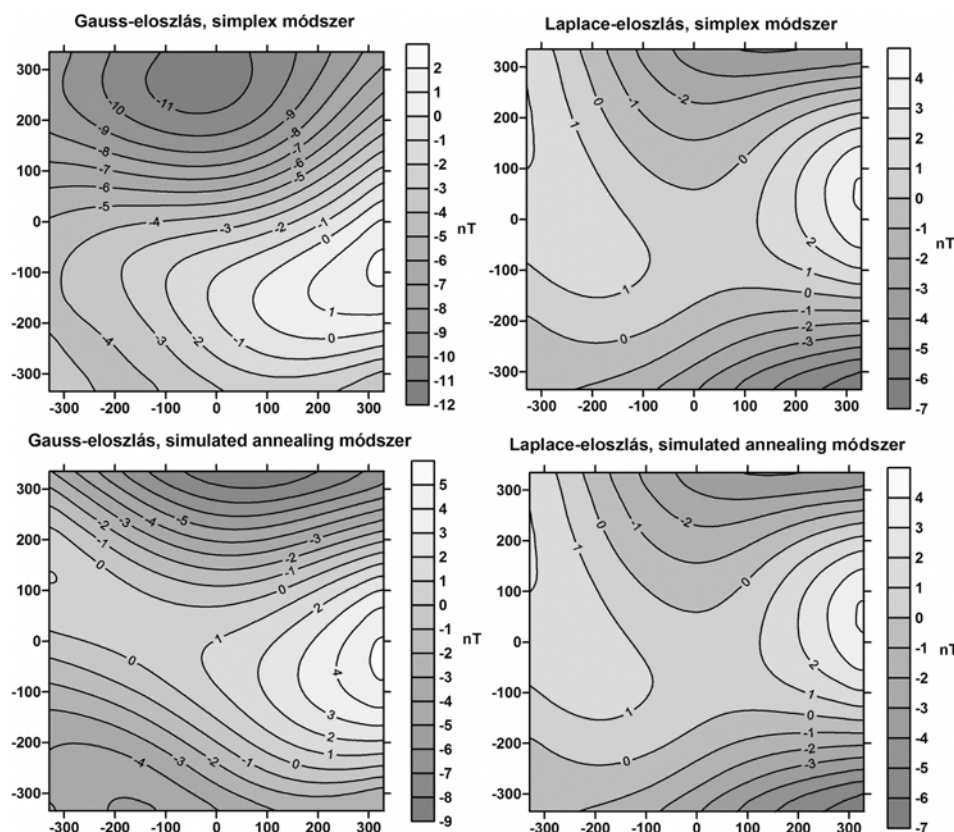
6. ábra *Simplex* módszerrel minimalizált függvény logaritmusának változása az iterációs lépések függvényében Gauss- és Laplace-féle paramétereloszlások esetében

Figure 6 Logarithm values of the objective functions determined by simplex method versus iterative steps in case of Gauss and Laplace distribution of the model parameters



7. ábra *Simulated annealing* módszerrel minimalizált függvény logaritmusának változása az iterációs lépések függvényében Gauss- és Laplace-féle paramétereloszlások esetében

Figure 7 Logarithm of the objective functions determined by simulated annealing method versus iterative steps in the case of Gauss and Laplace distribution of the model parameters



8. ábra | A simplex és simulated annealing eljárással meghatározott, Gauss- és Laplace-eloszlású modellparaméterek függvényében kiszámított reziduális anomáliák nT egységben, horizontális koordináták egysége km

Figure 8 | Residual anomalies in the case of the Gauss and Laplace distributed model parameters when the minimum problem is solved by simplex and simulated annealing methods; anomalies are plotted in nT units in gray scale, horizontal coordinates are given in km units

nimalizálандó függvények változását az iteráció során. A két ábra jól illusztrálja a minimumfeladatok megoldási módját.

Az a *posteriori* szórásokhoz szükséges deriváltakat (lásd (22) egyenlet) a direkt feladatot leíró egyenletek összetett volta miatt differenciahányadossal közelítettük. A meghatározott paraméterek hibáját a háromszoros szórással becsültük, melyeket szintén feltüntettünk az 1. táblázatban. A 8. ábra illusztrálja a reziduálokat mind a Gauss-féle, mind a Laplace-féle paramétereloszlások esetében és az alkalmazott kétféle optimalizálási eljárás vonatkozásában. A reziduálok azt mutatják, hogy a Laplace-eloszlásának megválasztott paraméterek és az L_1 normával megoldott optimumfeladat megoldása illeszkedik legjobban a kiválasztott modellhez.

A ható mágnesezettségének kialakulása

A Földön több helyen – Norvégia, Svédország, Kanada, Egyesült Államok és Ausztrália területén – mind a légi mérések, mind a mesterséges holdak mágneses mérései nagy kiterjedésű mágneses anomáliákat regisztráltak. Ezeken a területeken nagy mennyiségű, geológiai léptékben is idős, metamorfizálódott kőzetek hozzák létre a mágneses anomáliákat. Ezek az anomáliák gyakran negatív előjelűek.

A Mars Global Surveyor méréseiből is nagy amplitúdójú mágneses anomáliákat határoztak meg a mesterséges hold magasságában. Ezeket az anomáliákat szintén a továbbiakban vázolt folyamat hozhatta létre.

A CHAMP mesterséges hold méréseiből ÉNy–DK irányultságú negatív mágneses anomáliát határoztak meg, amelynek kiterjedése lefedi a Pannon-medencét és annak környezetét. A regisztrálás 300–400 km-es magasságából következik, hogy a mérések nem indikálják a lokális hatók mágneses terét. A nagy kiterjedésű mágneses anomália hatója valószínűleg a felső kéregben helyezkedik el. A nagyobb mélységben elhelyezkedő metamorf kőzetek a variszkuszi Európa keleti szegélyére esnek (Szederkényi 1996; Tari, Pamić 1998).

Több vizsgálat arra utal, hogy a metamorf kőzetek stabil remanens mágnesezettségét a hemoilmenit ásványok szétlegyedése hozza létre. A hemoilmenit sorozat ásványai közötti, a szételegyedés következtében kialakult remanens mágnesezettséget mutattak ki Délnyugat-Svédországban, ahol proterozoikus granulitokat (McEnroe et al. 2001), Norvégiában, Rogland területén, ahol proterozoikus anortozitokat (Robinson et al. 2002, McEnroe et al. 2004, 2005) és Dél-Norvégiában, a Modum területen, ahol metamorfizált összletet (Fabian et al. 2008) találtak. Norvégia és Svédország déli részén található zóna metamorf kőzetei 770 °C

hőmérsékleten és 7,5–10,5 kbar nyomáson alakultak ki a bennük előforduló kritikus ásványok vizsgálata alapján. A granulit fácies 975 millió éves proterozoikumi kőzetei metamorfizálódott dioritból és gabbróból alakultak ki, és tartalmaznak néhány százalékban hemoilmenit ásványokat. A szételegyedést, illetve a kontaktlamellák kialakulását az említett szerzők mind modellezéssel illusztrálták, mind pásztázó elektronmikroszkóppal mutatták ki.

Meg kell említeni, hogy a hematit önmagában antiferromágneses, esetleg parazitikus mágnesezettséggel rendelkezik, míg az ilmenit paramágneses tulajdonságokat mutat szobahőmérsékleten. A kőzetek lassú hűlése folyamán, amikor a hematit az ilmenittel találkozik, kontaktretek alakulnak ki. A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok a kontaktretegeket néhány nm méretű lemezszigetek formájában mutatták ki. A szételegyedés folyamán Fe^{2+} , Fe^{3+} és Ti kationok jelennek meg a kontaktretekben, amelyek nem tartoznak sem a hematithez, sem az ilmenithez.

A hematitban gazdag hemoilmenitekben a Fe^{2+} , Fe^{3+} és Ti kationok olyan formában helyezkednek el az alrácsokban, hogy ott antiferromágneses szerkezet alakul ki. Az ilmenitekben gazdag ferriilmenit-rétegekben váltakozva helyezkednek el Ti és Fe^{3+} kationok. A nagy Ti-tartalom következtében a ferriilmeniteknek kis Curie-pontja van, így paramágneses tulajdonságokat mutatnak szobahőmérsékleten.

Az önmagában antiferromágneses hematit egyenlő mértékben tartalmaz ellentétesen orientált mágneses momentumokat. A hematitok közé illeszkedő ilmenitrétegek megakadályozzák az ellentétesen orientált alrácsok momentumainak kiegyenlítődését, és ez hozza létre az eredő ferrimágneses momentumot.

Amennyiben a paramágneses ilmenitrétegek közé vékony hematitlamella illeszkedik, akkor a kontaktretek megbontják a hematitrétegek kiegyensúlyozottságát és szintén eredő mágneses momentumot hoznak létre.

Természetes körülmények között a kontaktretek mágneses telítettsége elérheti az 55 kAm^{-1} értéket, szemben a magnetit 480 kAm^{-1} , illetve a hematit $2,5 \text{ kAm}^{-1}$ telítési mágnesezettségével.

Kletetschka et al. (2002) vizsgálatai szerint szintén kialakulhat a hemoilmenitek stabil remanens mágnesezettsége. A remanens mágnesezettség a hűlés folyamán alakul ki, az antiferromágneses hematitlamellák többdoménűek, amelyek képesek intenzív termoremanens mágnesezettséget kialakítani. Ez a folyamat fokozódhat a későbbi szételegyedés folyamán.

A Pelsoi-egységhez tartozó, balatonfelvidéki pliocén bazaltokban található granulit és peridotikus xenolitokat többek között Embey-Isztin et al. (2003) és Dobosi et al. (2003) vizsgálta meg. A termobarometriai analízisek alapján a xenolitok keletkezési körülményei 800–950 °C hőmérsékletnek és 8–15 kbar nyomásnak felelnek meg. Így ezeknek a metaüledékes és metavulkáni xenolitok valószínű keletkezési mélysége 40–50 km. Ez a mélység lényegesen nagyobb, mint a jelenleg meghatározott 25–30 km-es kéregvastagság. A jelenlegi kéregvastagság a Pannon-medence harmadkori extenziója során alakult ki. A Pannon-medence legnagyobb

ÉNy–DK irányú extenziója késő bádeni korú (Konečný et al. 2002). Az alkáli bazaltos kőzetek a miocén mészkálai intenzív vulkánizmust követően a pliocén során jöttek létre, és ezek tartalmaznak a kéregből és a köpeny felső részéből származó xenolitokat (Embey-Isztin et al. 2001). A publikált vizsgálatok alapján feltételezhető, hogy a nagyobb mélységben fellelhető granulitokban is végbement a hemoilmenit ásványok szételegyedése.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki Márton Péter akadémikusnak, aki felhívta figyelmüket a metamorf kőzetekben kialakult lamelláris mágnesezettségre. Köszönet illeti Dr. M. Puruckert (Raytheon STX Corporation, NASA/GSFC) az adatok szíves kölcsönzéséért.

Hivatkozások

- Bayes T., 1763: An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. *Philosophical Transaction of the Royal Society* 53, 370–418 (republished in *Biometrika* 1958, 45, 293–315)
- Blakely R. J., 1995: *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press
- Box G. E. P., Tiao G. C., 1973: *Bayesian Inference in Statistical Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company, London – Don Mills – Reading – Menlo Park
- Bullard E. C., Cooper R. I. B., 1948: Determination of the masses necessary to produce a given gravitational field. *Proc. Roy. Soc. of London*, A194, 332–347
- Clarke G. K. C., 1969: Optimum second-derivative and downward-continuation filters. *Geophysics* 34, 424–437
- De Meyer F., 1974: Filter techniques in gravity interpretation. *Advances in Geophysics* 17, 187–261
- Dobosi G., Kempton P. D., Downes H., Embey-Isztin A., Thirlwall M., Greenwood P., 2003: Lower crustal granulite xenoliths from the Pannonian Basin, Hungary, Part 2: Sr-Nd-Pb-Hf and O isotope evidence for formation of continental lower crust by tectonic emplacement of oceanic crust. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 144, 671–683
- Duijndam A. J. W., 1988a: Bayesian estimation in seismic inversion. Part I: Principles. *Geophysical Prospecting* 36, 899–918
- Duijndam A. J. W., 1988b: Bayesian estimation in seismic inversion. Part II: Uncertainty analysis. *Geophysical Prospecting* 36, 878–898
- Embey-Isztin A., Dobosi G., Altherr R., Meyer H-P., 2001: Thermal evolution of the lithosphere beneath the western Pannonian Basin: evidence from deep-seated xenoliths. *Tectonophysics* 331, 283–305
- Embey-Isztin A., Downes H., Kempton P. D., Dobosi G., Thirlwall M., 2003: Lower crustal granulite xenoliths from the Pannonian Basin, Hungary. Part 1: mineral chemistry, termobarometry and petrology. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 144, 652–670
- Fabian K., McEnroe S. A., Robinson P., Shcherbakov V. P., 2008: Exchange bias identifies lamellar magnetism as the origin of the natural remanent magnetization in titanohematite with ilmenite exsolution from Modum, Norway. *Earth and Planetary Science Letters* 268, 339–353
- Kirkpatrick S., Gelatt Jr. C. D., Vecchi M. P., 1983: Optimization by simulated annealing. *Science* 220, 671–680
- Kis K., Pusztai S., 2006: Application of the magnetic field derivatives for locating Sarmatian graves. *Journal of Applied Geophysics* 60, 13–26

- Kis K., Taylor P. T., Pusztai S., Wittmann G., Hyung Rae Kim, Toronyi B., Mayer-Gürr T., 2006: A CHAMP mesterséges hold mágneses méréseinek értelmezése a Pannon-medence tartományában. *Magyar Geofizika* 47, 31–35
- Kis K., Wittmann G., 1995: A Magsat mesterséges hold mágneses méréseinek feldolgozása II. A mérési adatok interpolációja. *Magyar Geofizika* 36, 140–145
- Kis K. I., Wittmann G., 1998: Determination of vertical magnetic anomalies and equivalent layer for the European region from the Magsat measurements. *Journal of Applied Geophysics* 39, 11–24
- Kis K. I., Wittmann G., 2002: 3D reduction of satellite magnetic measurements to obtain magnetic anomaly coverage over Europe. *Journal of Geodynamics* 33, 117–129
- Konečný V., Kovač M., Lexa J., Šefara J., 2002: Neogene evolution of the Carpatho-Pannonian region: an interplay of subduction and back-arc diapiric aprise in the mantle. *EGU Stephan Mueller Special Publication Series I*, 105–123
- Kletetschka G., Wasilewski P. J., Taylor P. T., 2002: The role of hematite-ilmenite solid solution in the production of magnetic anomalies in ground and satellite-based data. *Tectonophysics* 347, 166–177
- McEnroe S. A., Harrison R. J., Robinson P., Golla U., Jercinovic M. J., 2001: Effect of fine-scale microstructures in titanohematite on the acquisition and stability of natural remanent magnetization in the granulite facies metamorphic rocks, southwest Sweden: Implications for crustal magnetism. *Journal of Geophysical Research* 106/B12, 30523–30546
- McEnroe S. A., Langenhorst F., Robinson P., Bromiley G. D., Shaw C. S. J., 2004: What is magnetic in the lower crust? *Earth and Planetary Science Letters* 226, 175–192
- McEnroe S. A., Harrison R. J., Jackson M. J., Hirt A. M., Robinson P., Langenhorst F., Heidelbach F., Kasama T., Putnis A., Brown L. L., Golla-Schindler U., 2005: Lamellar magnetism: Effects of interface versus exchange interactions of nanoscale exsolutions in ilmenite-hematite system. *Journal of Physics: Conference Series* 17, 154–167
- Menke W., 1989: *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. Academic Press, Inc., San Diego–New York–Boston–Sydney–Tokyo–Toronto
- Mesko A., 1984: *Digital Filtering: Applications in Geophysical Exploration for Oil*. Akadémiai Kiadó, Budapest
- Olsen N., Manda M., Sabaka T. J., Toffner-Clasen L., 2009: CHAOS-2 a geomagnetic field model derived from one decade of continuous satellite data. *Geophysical Journal International* 179, 1477–1487
- Plouff D., 1976: Gravity and magnetic fields of polygonal prism and application to magnetic terrain corrections. *Geophysics* 41, 727–741
- Reigber C., Lühr H., Schwintzer P. (Szerk.), 2003: *First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetism and Atmospheric Studies*. Springer-Verlag, Berlin
- Reigber C., Lühr H., Schwintzer P. (Szerk.), 2005: *Earth Observations with CHAMP Results from Three Years in Orbit*. Springer-Verlag, Berlin
- Robinson P., Harrison R., McEnroe S. A., Hargraves R. B., 2002: Lamellar magnetism in the haematite-ilmenite series as an explanation for strong remanent magnetization. *Nature* 418, 517–520
- Sen M., Stoffa P. L., 1995: *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion*. Elsevier, Amsterdam–Lausanne–New York–Oxford–Shannon–Tokyo
- Szederkényi T., 1996: Metamorphic formations and their correlation in the Hungarian part of the Tisia Megaunit (Tisia Composite Terrane). *Acta Mineralogica-Petrographica, Szeged* 37, 143–160
- Tarantola A., 1987: *Inverse Problem Theory*. Elsevier, Amsterdam–Oxford–New York–Tokyo
- Tari V., Pamić J., 1998: Geodynamic evolution of the northern Dinarides and southern part of the Pannonian Basin. *Tectonophysics* 297, 269–281
- Taylor P. T., Kis K., von Frese R. R. B., Korhonen J. V., Wittmann G., Hyung Rae Kim, Larmie V., 2005: A különböző kéregvastagság indikálása a CHAMP gravitációs és mágneses mérései alapján. *Magyar Geofizika* 46, 19–24
- Véges I., 1971: Map plotting with weighted average on the surface of a circular disc. *Pure and Applied Geophysics* 78, 5–17
- Walsh G. R., 1975: *Methods of Optimization*. John Wiley & Sons, London–New York–Sydney–Toronto

Mágneses fázisátalakulás és a magnetotellurika

KISS JÁNOS^{1,*}, PRÁCSEER ERNŐ¹, SZARKA LÁSZLÓ², ÁDÁM ANTAL²

¹Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, H-1145, Budapest, Kolumbusz u. 17–23.

²MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet, H-9400, Sopron, Csatkai E. u. 6–8.

*E-mail: kiss@elgi.hu

Egy korábbi publikációnkban feltételeztük, hogy a mágneses szuszceptibilitásnövekedéssel járó és a Curie-hőmérsékleten bekövetkező ún. másodrendű mágneses fázisátalakulás a földkéregben is előfordulhat, sőt a felszínen mágneses és magnetotellurikus anomáliákat okozhat. A jelenség kézenfekvő magyarázatot nyújtana több ismeretlen eredetű földmágneses és magnetotellurikus anomália eredetére. Ebben a cikkben a mágneses fázisátalakulás magnetotellurikus következményeit vizsgáljuk egy- és kétdimenziós modellezés segítségével. Eredményeink szerint egy nagy mágneses permeabilitású, rétegszerű ható nagyon hasonló hatást okoz, mint egy jól vezető réteg, csak ellentétes előjellel. A klasszikus magnetotellurikus inverzió eredményeiben a nagy mágneses permeabilitású réteg a Curie-mélységben kezdődő, irreálisan nagy ellenállású és rendkívül vastag réteggént jelenik meg. Azokon a helyeken, ahol a jelenséggel találkozunk, és a területen található mágneses anomália hullámhossza is ugyanarra a mélységre utal, ott nem zárható ki a másodrendű mágneses fázisátalakulás jelenléte. Ilyen sajátosságokat mutat a PGT–1 szelvény mentén a Túrkeve-Csodaballa térségében tapasztalt magnetotellurikus és mágneses anomália. Bár a jelenség bizonyításához közvetlen köztérfizikai kísérletek lennének szükségesek, különféle szilárdtestfizikai anyagvizsgálatok eredményei egyre valószínűbbé teszik, hogy a kéreg eredetű geofizikai anomáliák egyik okozója a Curie-hőmérsékleti mágneses fázisátalakulás.

Kiss, J., Prácser, E., Szarka, L., Ádám, A.: Magnetic phase transition and the magnetotellurics

In an earlier paper we suggested a possible additional source of geomagnetic and crustal conductivity anomalies: the so-called second-order magnetic phase transition in the Earth's crust, namely a significant enhancement of the magnetic susceptibility near the Curie (Néel) depth. Some geomagnetic anomalies of unknown origin can be easily explained by this phenomenon. In this paper we summarize the one- and two-dimensional magnetotelluric signatures due to a thin but very high-permeability body at mid-crustal depths. The magnitude of the anomaly due to a high-permeability layer is comparable to that due to a high-conductivity layer, with opposite sign. Wherever the classical magnetotelluric interpretation produces an unrealistic high-resistivity and extremely thick layer, and the nearby geomagnetic anomalies have a spatial wavelength indicating the same depth as the depth of the high resistivity layer, the second-order magnetic phase transition might be also considered as a possible explanation. Although it has been still questionable whether this phenomenon exists in the Earth's crust, some recent solid state physics laboratory results make it more and more probable that the magnetic phase transition might be a potential source of various geophysical crustal anomalies.

Beérkezett: 2010. június 14.; *elfogadva:* 2010. augusztus 19.

1. Bevezetés

Az anyagok mágnesezettsége (M) két részből áll: egyrészt az anyagra jellemző spontán vagy remanens mágnesezettségből (M_r), másrészt a külső mágneses tér által gerjesztett indukált mágnesezettségből (M_i). Az indukált mágnesezettség gyenge mágneses tér esetén arányos a külső gerjesztő térrel (H). A mágnesezettséget ennek megfelelően – skalárisan – a következőképpen írhatjuk fel:

$$M = M_{\text{total}} = M_r + M_i = M_r + \chi H. \quad (1)$$

Az arányossági tényező a mágneses szuszceptibilitás ($\chi = dM_i/dH$), amely függ többek között a mágneses tér erejétől (H) és a hőmérséklettől (T). A mágneses szuszceptibilitás ($\chi_{\text{SI}} = 4\pi\chi_{\text{CGS}}$) és a relatív mágneses permeabilitás közötti összefüggés a következő:

$$\mu_r = 1 + \chi, \text{ ahol } \mu_r = \mu/\mu_0 \text{ és } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/(Am)}. \quad (2)$$

A Föld mágneses tere (H_E) gyenge, 40 A/m ($\sim 0,5$ oersted, $47500 \text{ nT}^{(1)}$) térerősségű. A mágnesezettség értéke adott T hőmérsékleten és H_E mágneses térerősség esetén a következő képlettel írható le:

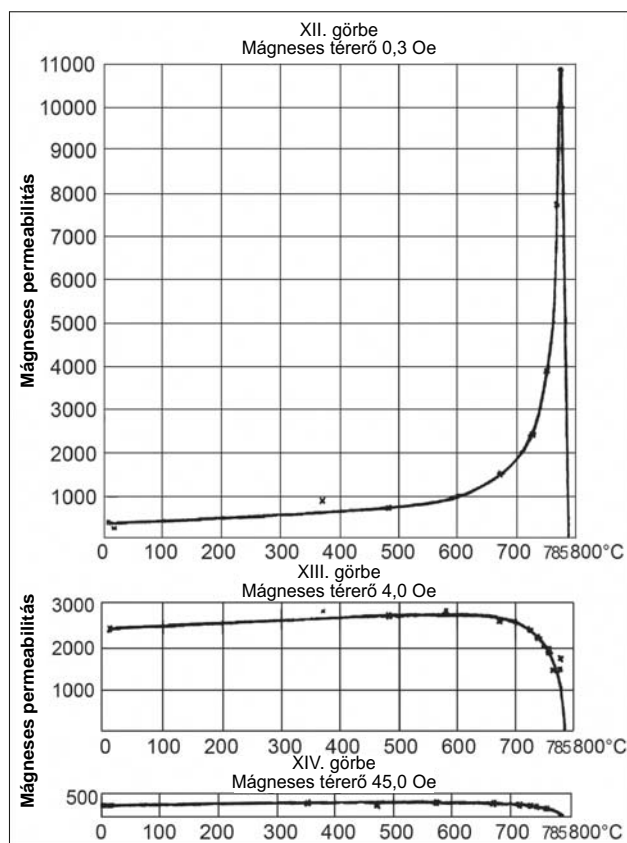
$$M_{\text{total}}(T, H_E) = M_r(T, 0) + H_E \sum \chi, \quad (3)$$

ahol az összegzés arra a mágnesezhető közegre vonatkozik, amelyet a χ mágneses szuszceptibilitástenzorral jellemezhetünk.

Az anyagban lejátszódó mágneses fázisátalakulás (azaz az anyag átalakulása a Curie-hőmérsékleten ferromágneses állapotból paramágneses állapotba) egy másodrendű fázisátalakulás. Másodrendű, mert az energia második deriváltjában, a mágneses szuszceptibilitás értékében figyelhető meg szakadás. A szakadás anyagfüggő, és a mágneses szuszceptibilitás rendkívüli mértékű megnövekedésével jelentkezik, közvetlenül a Curie-hőmérséklet alatt.

Vasmintákon végzett laboratóriumi kísérleteiben John Hopkinson már a XIX. század végén kimutatta:

- a mágneses permeabilitás 50-szeres (~ 200 -ról $\sim 11\,000$ -ig) megnövekedését, azaz a később róla elnevezett, 1. ábrán látható Hopkinson-csúcsot (Hopkinson 1889);



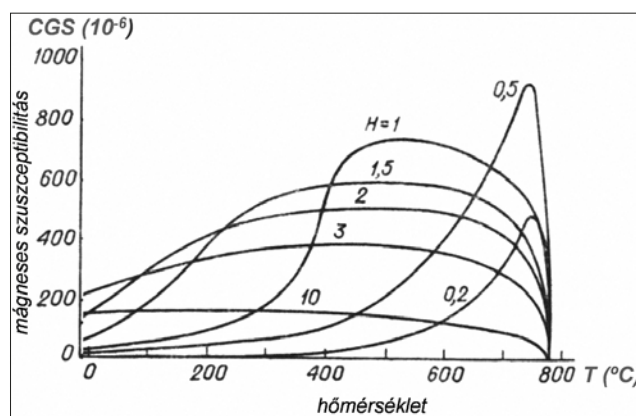
1. ábra John Hopkinson 1885-ben végzett kísérletének eredménye: a mágneses permeabilitás hőmérsékletfüggésének viselkedése a vasnál háromféle (0,3, 4,0 és 45,0 Oe) eltérő térerő alkalmazása esetén (Hopkinson 1889)

Figure 1 Variation of the magnetic permeability of iron as a function of the temperature, in case of three external magnetic field intensities: 0.3, 4.0 and 45.0 Oe (original figure by Hopkinson 1889)

- a fajhő körülbelül 200-szoros megnövekedését (Hopkinson 1890), amelyre a kihűlő vas átkristályosodási hőleadása (vagy újrafelizzása, az ún. *re-calescence* jelenség) alapján jött rá;
- az elektromos ellenállás (Hopkinson 1889) hőmérsékleti koefficiensének megváltozását.

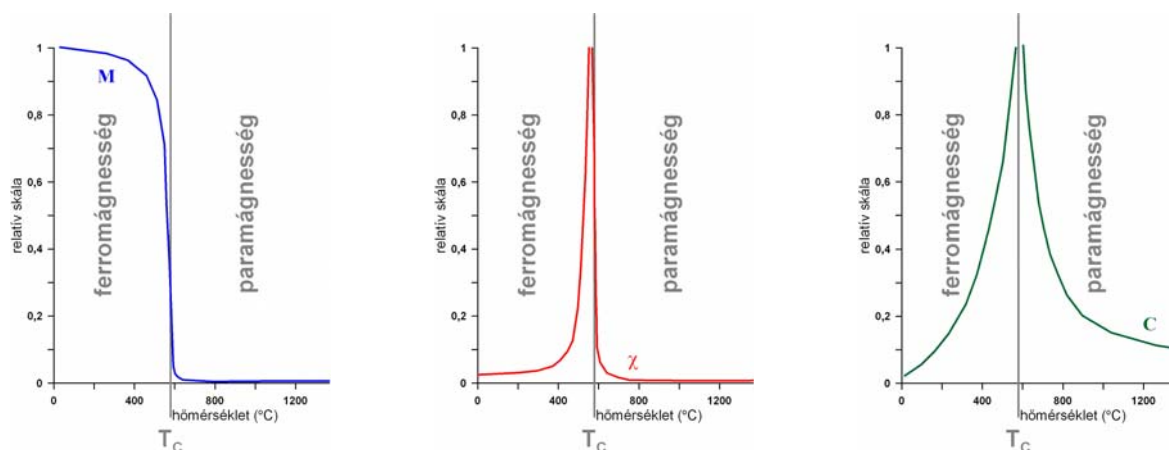
Hopkinson kísérleteiből (1. ábra) látszik, hogy a fázisátalakulás során a mágneses szuszceptibilitás változása a mágneses térerősségtől függ. Kis és nagy térerősség – 0,3 Oe, illetve 4,0 Oe – esetén eltérő mértékű változásokat lehet tapasztalni a szuszceptibilitás értékében (2. ábra). A görbék 1,0 Oe-nél nagyobb térerő esetén, a Curie-hőmérséklet környezetében (a vas esetében 770°C) szuszceptibilitáscsökkenést, kisebb térerő esetén szuszceptibilitásnövekedést, illetve -maximumot mutatnak.

A XX. századi anyagismereti kutatások nemcsak igazolták ezeket a korai mérési eredményeket, de elvezetnek bennünket a napjaink szilárdtest-fizikai kutatásainak középpontjában álló kritikus jelenségekig. Ideális esetben a mágneses szuszceptibilitás megnövekedése a Curie-hőmérsékleten (ferromágneses anyagok esetén Néel-hőmérsékleten) elvileg végtelen nagyságú (Cracknell et al. 1976). Különböző anyagokon elvégzett precíz laboratóriumi kísérletek (mikrorétegeken elvégzett vizsgálatok) nemcsak a mágneses szuszceptibilitás, hanem a fajhő értékében és más fizikai paraméterek esetében is jelentős változásokat, maximumokat mutattak ki. A másodrendű mágneses fázisátalakulás során végbemenő változásokat – a remanens mágnesezettség, a szuszceptibilitás és a fajhő megváltozását – a 3. ábra mutatja (Gould és Tobochnyik 2005 vagy Jiles 1998). A remanens mágnesezettség a kritikus hőmérséklet közelében megszűnik, az indukált mágnesezettség – a mágneses szuszceptibilitásnövekedésnek köszönhetően – viszont egyre jelentősebb, ld. a (3) képletet.



2. ábra A szuszceptibilitásváltozás hőmérsékletfüggése különféle intenzitású mágneses tér esetén a vasnál (Logacsov és Zaharov 1979), görbeparaméter: mágneses térerő oerstedben

Figure 2 Variation of the magnetic susceptibility of iron as a function of the temperature (after Logachev and Zakharov 1979) at different external magnetic field (parameter of the curves: field value in oersted)



3. ábra A remanens mágnesezettség (M), a szuszceptibilitás (χ) és a fajhő (C) elvi megváltozása a mágneses fázisátalakulás során (Gould, Tobochnik 2005 alapján)

Figure 3 Schematic behavior of the magnetization (M), magnetic susceptibility (χ) and specific heat capacity around the Curie temperature (C) (after Gould, Tobochnik 2005)

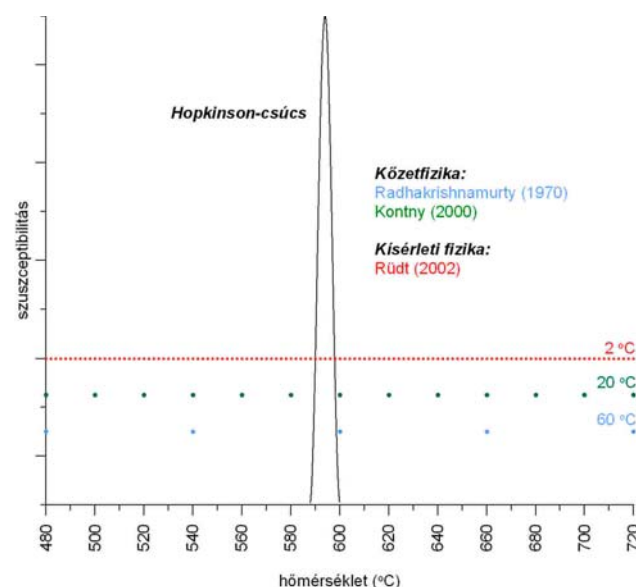
Mivel a mágneses anyagok többségének kritikus hőmérséklete a kéreg, illetve a középső kéreg mélységében van (a leggyakoribb mágneses ásvány, a magnetit kritikus hőmérséklete például 580 °C), így azt feltételeztük (Kiss et al. 2005a,b), hogy ez a jelenség fontos szerepet játszhat a kéregbeli különféle geofizikai anomáliák kialakulásában.

Ebben a tanulmányban a szuszceptibilitásnövekedés magnetotellurikus következményeit taglaljuk. Korábbi tanulmányunk (Szarka et al. 2010) gondolatmenetét követve megvizsgáljuk a földkéregbeli Hopkinson-csúcs nagyságát, majd a jelenség mágneses és magnetotellurikus következményeit vesszük számba. A mágneses fázisátalakulás elmélete mellett új analitikus és numerikus számítási eredményeket, valamint egy terepi esettanulmányt is bemutatunk, továbbá felhívjuk a figyelmet néhány, a fázisátalakulással kapcsolatban felmerülő merőben új összefüggés lehetőségére.

2. Mekkora Hopkinson-csúcs alakulhat ki a földkéregben?

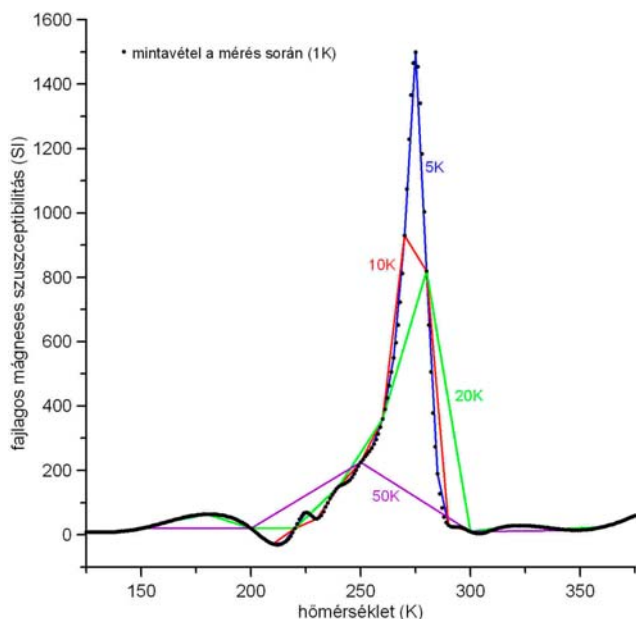
Míg az ideális anyagokon (mikrovastagságú lemezek) elvégzett kísérletek a Hopkinson-csúcs körülbelül 100-szoros mágneses szuszceptibilitásnövekedést mutatnak (Rüdt et al. 2002), addig a közt fizikai kísérletek során mindössze legfeljebb 3–4-szeres növekedést állapítottak meg (Dunlop^b) és Özdemir 2007). Így a közt fizikusok eléggé szkeptikusak a földkéregbeli Hopkinson-effektus megítélésével kapcsolatban (Hrouda 2006, Márton 2008). Sajnos a közt fizikai Curie-pont-meghatározások lényege nem a Hopkinson-csúcs kimérése, hanem – a Curie-hőmérséklet alapján – az ásványos összetétel meghatározása (Petrovský, Kapička 2006). A modern közt fizikai mérési körülmények alkalmasak a Curie-hőmérséklet körülbelüli megmérésére (ami elegendő az ásványtani azonosításhoz), de elégtelenek a Hopkinson-csúcs pontos meghatározására.

A másodrendű mágneses fázisátalakulás egy kb. 10–15 °C-os hőmérsékleti intervallumban zajlik le. A hőmérséklet-suszceptibilitási görbe teljes megismeréséhez nagyon sűrű (legalább 1 °C-os) mintavételezés lenne szükséges az általánosan elterjedt 10–20 °C-onkénti mintavételezéssel szemben. A mintavételezésből származó problémákat a 4. és 5. ábra illusztrálja. A 4. ábra az anyagvizsgálati (Rüdt et al. 2002) és közt fizikai vizsgálatok (Kontny, de Wall 2000; Radhakrishnamurty, Likhite 1970) eltérő mintavételezési gyakorlatát szemlélteti. Az 5. ábra egy pontosan kimért Hopkinson-effektus (Rüdt et al. 2002) szuszceptibilitás-csúcsértékének torzulását mutatja be a mintavétel ritkítása esetén. Meg kell említeni még néhány méréstechnikai elégtel-



4. ábra Anyag- és közt fizikai vizsgálatok eltérő mintavételezési gyakorlatának szemléltetése

Figure 4 Inappropriate and appropriate sampling rate (Rock Physics and Solid State Physics)



5. ábra A Hopkinson-effektus szuszceptibilitás-csúcsértékének torzulása a mintavételezési sűrűség csökkentése esetén

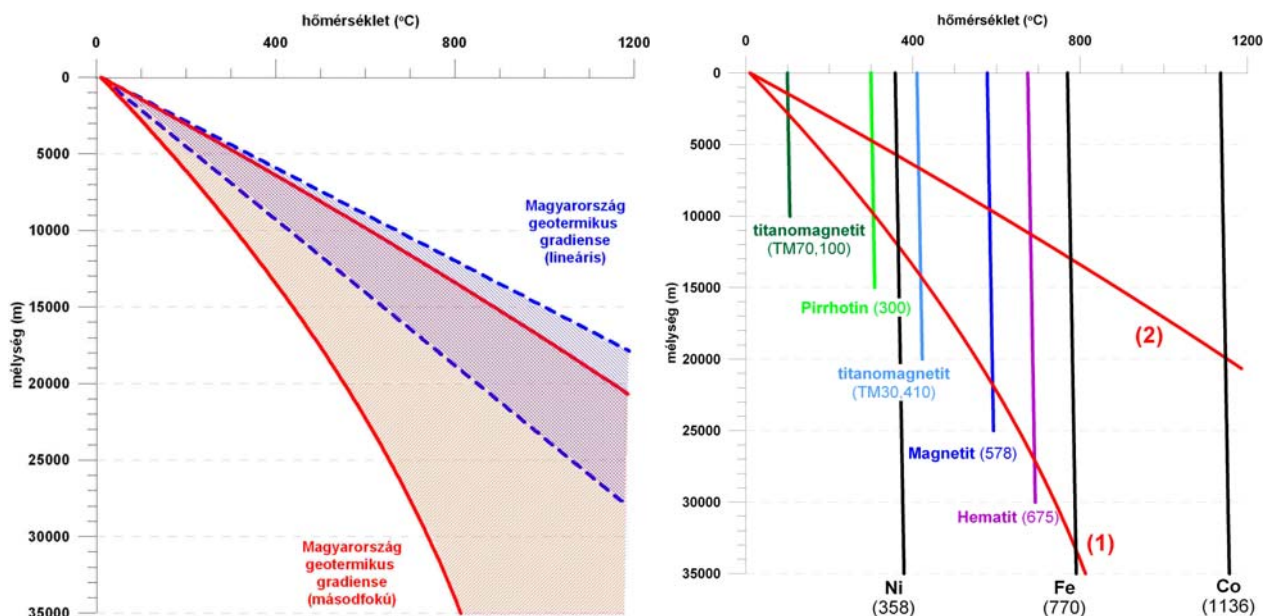
Figure 5 Effect of the sampling rate: if the sampling interval is larger the Hopkinson effect will be smaller

lenséget is: a mintatesten belüli hőmérsékleti inhomogenitást (a minta nem egyenletes felfűtése miatt a közepe később, a kérge előbb éri el az adott hőmérsékletet), valamint a földi mágneses térnél sokkal erősebb mágnesező tér alkalmazását (a mágneses szuszceptibilitás viselkedése függ a térerő

nagyságától). Már Hopkinson (1889) is azt tapasztalta, hogy a földihez hasonló kis mágneses térerősségek (0,3 Oe) esetén észlelhető a legintenzívebb csúcs, a szuszceptibilitás maximuma, de tízszeresre megnövekedett mágneses térerősség (4,0 Oe) alkalmazása már szuszceptibilitáscsökkenést eredményez. A mai szuszceptibilitásmérő berendezések (kappaméterek) a földi térerő 7,5 szeresének megfelelő 300 A/m térerősség (KLY-2) mellett mérik a szuszceptibilitás változását⁹⁾.

A mikrorétegeken (Rüdt et al. 2002) és a közetfizikai laboratóriumokban végzett mérések között még egy számottevő különbség van, a minta geometriája. A mágnesség szempontjából a ferromágneses test geometriájának fontos szerepe van a könnyű, illetve a nehéz mágnesezettségi irányok miatt. Ugyanannak az anyagnak az „elnyújtott” rétegszerű vagy örleményszerűen kevert, esetleg izomorf alakú változata eltérő eredő mágneses hatást mutat, ami a doménok egymáshoz való helyzetével, illetve azok kölcsönhatásával és a lemágnesződési paraméter változásával magyarázható.

A földkéregben – ebben a természetes földi laboratóriumban – a mágneses fázisátalakulás kialakulásához és tartós fenntartásához ideálisak a körülmények: állandó a hőmérséklet, és megfelelő értékű a mágnesező tér. A határfelületek mentén található mágneses anyagok esetében könnyen kialakulhat a könnyű mágnesezési irányba mutató mágnesezettség. A bázikus összetételű kőzetek az oxidációs zónába kerülve^{d)} alakulnak át mágneses hatóvá. Ebből következik, hogy a bázikus összetételű kőzetek kontaktusa mellett, pl. tektonikai vonalak mentén, szinte mindenhol számíthatunk mágneses hatókra.



6. ábra Hőmérséklet–mélység függés a (4) másodfokú összefüggés alapján és a ferromágneses ásványok Curie-hőmérsékletének mélysége Magyarországon, geotermikus minimális (1), illetve maximális (2) hőfluxus esetén

Figure 6 The depth–temperature dependence of Hungary by using the quadratic formula (4) and the possible depth of Curie temperature at these minimal (1) and maximal (2) geothermal conditions of different elements and minerals

A közetfizikusok a földkéreg anyagi összetételének inhomogenitásából kiindulva kételkednek a jelenség természetes előfordulásában. A mágneses fázisátalakulás kialakulásához valóban szükséges az anyag homogenitása is, helyenként azonban könnyen elképzelhető, hogy kellően homogén, mágnesezhető anyag található a Curie-mélységben.

Vizsgálataink során az egyszerűség kedvéért a kritikus állapotban lévő anyagok relatív mágneses permeabilitását 100-nak vesszük. (A részleteket lásd Kiss et al. (2005a) 1. táblázatában.)

3. Geotermikus tényezők

A különböző módszerek alapján végzett hőmérséklet-mélységre vonatkozó meghatározások hamar bebizonyították, hogy a lineáris geotermikus gradiens korlátozottan alkalmazható, de csak áttételelesen veszi figyelembe a hőtermelési, hővezetési és hőáramlási tényezőket. Magyarország geotermikus adottságaival korábbi években behatóan foglalkozott Dövényi et al. (1983) és Lenkey et al. (2002). Munkáikban publikálták az átlagos (minimális és maximális) geotermikus adottságokat. Ezeket figyelembe véve sokkal pontosabb mélységi hőmérsékletfüggés számítható.

Ennek megfelelően a lineáris hőmérséklet-mélység összefüggés (Kiss et al. (2005b), 2. ábra) helyett Fowler (2005) alapján számított, négyzetes mélység–hőmérséklet összefüggést alkalmazunk (6. ábra), ami jobban figyelembe veszi a Kárpát-medence átlagos geotermikus adottságait. Fowler (2005) kétféle képletet is közlött a hőmérséklet-mélység összefüggésre. Az egyik – az egyszerűbb –, amikor az asztenoszféra felett csak egy réteggel számol, a következő:

$$T = (A/2k)Z^2 + [(Q + Ad)/k]Z, \quad (4)$$

ahol a Pannon-medencére alkalmazott paraméterek a következők:

	1)	2)
hővezetés (k):	2,67 W/(m°C),	2,67 W/(m°C),
hőtermelés (A):	1,5 μ W/m ³ ,	1,5 μ W/m ³ ,
hőfluxus (Q):	50 mW/m ² ,	130 mW/m ² ,
köpenymélység (d):	25 km,	25 km,
mélység (Z)	mint független változó,	
hőmérséklet (T)	mint függő változó.	

A mágneses fázisátalakulás mélysége az adott helyen előforduló mágneses ásvány Curie-hőmérsékletétől függ. A természetben előforduló ásványok Curie-hőmérséklete a 100–700 °C közötti tartományban található (titanomagnetit: összetételtől függően 100–300 °C, pirrotin: 400 °C, magnetit: 578 °C, hematit: 675 °C). A Curie-hőmérséklet mélységét a geotermikus adottságok szabják meg. Mivel mélyfúrásai hőmérsékletadatok csak kb. 300 °C-ig léteznek (De-recske–1 fúrás, Dövényi, Horváth 1988), így a geotermikus adottságokról és a Curie-mélység tényleges értékéről csak közvetve szerezhetünk információt. A 6. ábra az ásványok Curie-hőmérsékletét mutatja a Fowler-féle hőmérséklet-mélység összefüggést leíró görbékkel, amelyekkel a Curie-

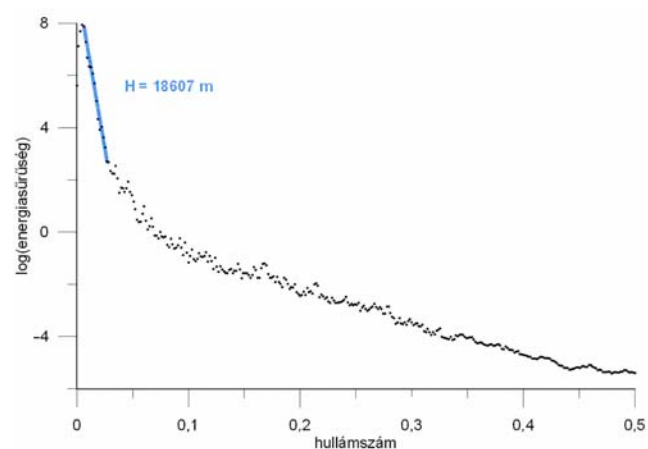
mélységet legalább becsülhetjük. Az ábrán a Curie-hőmérsékletet jelző vonalak ferdeségét a gyenge nyomásfüggőség okozza (Carmichael 1982).

Az a hőmérséklet-tartomány, amelyben a mágneses szuszceptibilitás maximális értékű, kb. 10 °C-ot foghat át, ami első közelítésben – 20–50 °C/km geotermikus gradiens esetén – 500–200 m vastagságú kritikus állapotú réteget jelent. Így, ha a földkéregben a mágneses fázisátalakuláskor jelentkező szuszceptibilitásnövekedés reális, akkor azt egy vékony, lemezszerű, vízszintesen elnyúlt modellként (a modell felvételénél végtelen kiterjedésű, vagy egyik, esetleg mindkét vízszintes irányban véges kiterjedésű vékony lemezként) lehet elképzelni. Az egydimenziós alapmodell ennek megfelelően nagyon egyszerű: egy olyan féltér, amely az elektromos vezetőképesség szempontjából homogén, a mágneses permeabilitás szempontjából ugyanakkor háromréteges.

4. Földmágneses anomáliák

A földmágneses anomáliák spektrális jellege alapján becslés adható a mágneses hatók mélységére. A legnagyobb térhullámhossz (azaz a legkisebb térfrekvencia) a legmélyebben fekvő mágneses hatók mélységére, a Curie-mélységre utal. A mágneses fázisátalakulás jelenségének feltételezésével a mágneses anomáliák okozója nemcsak a Curie-hőmérsékletnél kisebb hőmérsékleten jelenlévő – ásványtani tanulmányokból ismert mágneses szuszceptibilitású – közet, hanem közvetlenül a Curie-hőmérsékleten kritikus állapotú, igen nagy mágneses szuszceptibilitású anyag is.

A magyarországi pólusra redukált mágneses anomáliák alapján meghatározott (Kiss 2009) átlagos Curie-pont-mélység 18–19 km (7. ábra), amely összhangban van a geotermikus adottságok alapján meghatározott Curie-mélységgel (6. ábra). A titanomagnetit Hopkinson-csúcsa alacsonyabb hőmérsékletű, ennek megfelelően a kritikus állapot is kisebb mélységben jelentkezik.



7. ábra A mágneses anomáliák spektruma alapján meghatározott átlagos Curie-mélység Magyarországon

Figure 7 Spectral depth estimation of deepest magnetic sources, the average Curie depth of Hungary

Érdemes megjegyezni, hogy egy vízszintes mágneses lemeznek csak a peremei okoznak a felszínen kimutatható mágneses anomáliát, a középső része nem, ezért a mágneses mellett keresni kell egy másik geofizikai módszert, amely érzékenyen reagál a lemez középső részén is a nagy relatív mágneses permeabilitásra. Erre lehet alkalmas a magnetotellurika.

5. Magnetotellurika

A magnetotellurikában általánosan feltételezik, hogy $\mu \approx \mu_0$. Ez a feltételezés a szokásos közetmágnesség-értékek esetén jól működik. A relatív mágneses permeabilitás jelentős megnövekedése azonban drasztikusan megváltoztatja a helyzetet, és a $\mu \approx \mu_0$ feltételezéssel a magnetotellurikus inverzió hibás eredményt ad. A jelenséget Rijo (2003) és Cao et al. (2004) is tapasztalta. A következőkben összefoglaljuk a rendkívül nagy relatív mágneses permeabilitás hatását a magnetotellurikus direkt és inverz feladat megoldására.

5.1. Homogén feltér

Homogén feltér esetén az elektromágneses hullámterjedést (a csillapodást) a γ hullámszám határozza meg, amely egy komplex szám:

$$\gamma^2 = i\omega\mu\sigma, \quad (5)$$

ahol ω a körfrekvencia, μ a mágneses permeabilitás és σ az elektromos vezetőképesség.

Nagy mágneses permeabilitású közegben az elektromágneses hullám csillapodása nagyobb, ebből adódóan a behatolási (vagy *skin*-) mélység (δ) kisebb lesz:

$$\delta = \frac{1}{\text{Re } \gamma} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}, \quad (6)$$

ahol $\text{Re } \gamma$ a hullámszám valós része.

A fázissebesség ν értéke szintén csökkenni fog:

$$\nu = \frac{\omega}{\text{Re } \gamma} = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{\omega}{\mu\sigma}}. \quad (7)$$

Az eddig vizsgált paraméterek (γ , δ , ν) mindegyikére igaz, hogy a mágneses permeabilitás (μ) és az elektromos vezetőképesség (σ) hasonló módon változtatja meg, azaz a μ növekedése ugyanolyan hatást okoz, mint a σ növekedése.

Érdemes megjegyezni, hogy az ún. $M_{xy} = E_x/B_y$ magnetotellurikus tenzorelem (Weaver 1994) lényegében a fázissebességet adja meg (attól csak egy konstans szorzó értékével, $\sqrt{2}$ -vel tér el):

$$M_{xy} = \left| \frac{E_x(\omega)}{B_y(\omega)} \right| = \frac{\omega\mu}{\mu|\gamma|} = \sqrt{\frac{\omega}{\mu\sigma}}. \quad (8)$$

A nagy mágneses permeabilitású közeg ugyanakkor megnöveli az impedancia értékét:

$$Z_{xy} = \left| \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \right| = \frac{\omega\mu}{|\gamma|} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{\omega\mu\rho}. \quad (9)$$

Itt már láthatjuk, hogy a mágneses permeabilitás (μ) az ellenállással ($\rho = 1/\sigma$) jelenik meg párhuzamosan, és a μ növekedése – a ρ növekedésének megfelelően – az impedancia növekedését okozza.

A nagy mágneses permeabilitású közeg következményei tehát a következők: erős csillapodás (azaz kis behatolás, ld. (6) képlet), kis fázissebesség (ld. (7) képlet) és nagy látszólagos fajlagos ellenállás (ld. (9) képlet).

5.2. Egydimenziós modellezés (rétegzett modell)

Amennyiben a közeg nem homogén, hanem pl. rétegzett feltérrel van szó, akkor a (9) képlet a következőképpen módosul:

$$Z_{xy} = \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} = \frac{\omega\mu_1}{|\gamma_1|} R_n, \quad (10)$$

ahol

$$R_n = f(\gamma_1, d_1, \mu_1, \gamma_2, d_2, \mu_2, \dots, \gamma_n, d_n, \mu_n). \quad (11)$$

A (10), (11) összefüggések rekurziós képletét a Függelék mutatja részletesen.

Tételezzünk fel egy mágneses permeabilitás szempontjából háromréteges, az elektromos fajlagos ellenállás szempontjából homogén feltérmodellt (1. táblázat):

1. táblázat | Egydimenziós rétegzett modell, a kiindulási modell

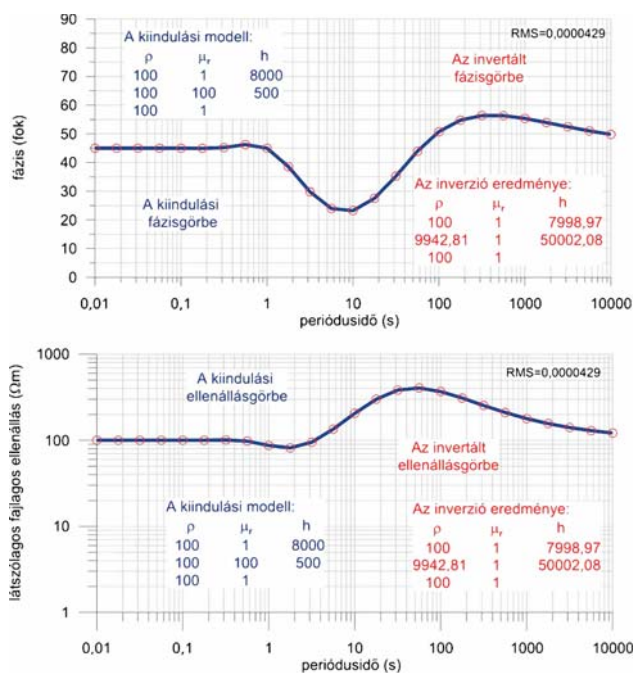
Rétegek (j)	(μ_j)	ρ_j [Ωm]	d_j [m]	h_j [m]
1	1	100	8000	0
2	100	100	500	8000
3	1	100		8500

A klasszikus magnetotellurikus inverzió rendkívül nagy ellenállású és rendkívül vastag réteget jelez. Az eredményeket a 2. táblázat és a 8. ábra mutatja.

2. táblázat | Az inverzió után kapott rétegzett modell

Rétegek (j)	(μ_j)	ρ_j [Ωm]	d_j [m]	h_j [m]
1	1	100	8000	0
2	1	9443	50002	8000
3	1	100		58002

A Függelék analitikus képletei, (F1) és (F2) alapján meggyőződhetünk róla, hogy az inverziós eredményekben megfigyelhető közel százszoros fajlagos ellenállás- és rétegvastagság-növekedést – mint ahogyan sejthető volt – valóban a mágneses permeabilitás százszoros megnövekedése okozza. Mivel a képletekben csak a $\gamma_j d_j$ és a γ_j/d_j mennyiségek szerepelnek, ezért a $\gamma_j d_j$ mennyiségéből a $\mu_j d_j$ szorzat, míg a γ_j/μ_j -ből a $\mu_j \rho_j$ mennyiség határozható csak meg. Belátható tehát, hogy egydimenziós magnetotellurikus inverzióból a



8. ábra A háromréteges feltérmodellre kiszámított direkt feladat és az inverzió eredménye

Figure 8 Magnetotelluric sounding curves (impedance phase and apparent resistivity) together with the start model and the classical inversion results

réteg mágneses permeabilitását (μ_r) és fajlagos elektromos ellenállását (ρ_j) külön-külön lehetetlen meghatározni.

Három réteg esetén a magnetotellurikus inverzió az alábbi rétegpárparamétereket képes szolgáltatni:

$$\begin{aligned}\rho_1^* &= \mu_{1r} \rho_1, & d_1^* &= \mu_{1r} d_1, \\ \rho_2^* &= \mu_{2r} \rho_2, & d_2^* &= \mu_{2r} d_2, \\ \rho_3^* &= \mu_{3r} \rho_3.\end{aligned}$$

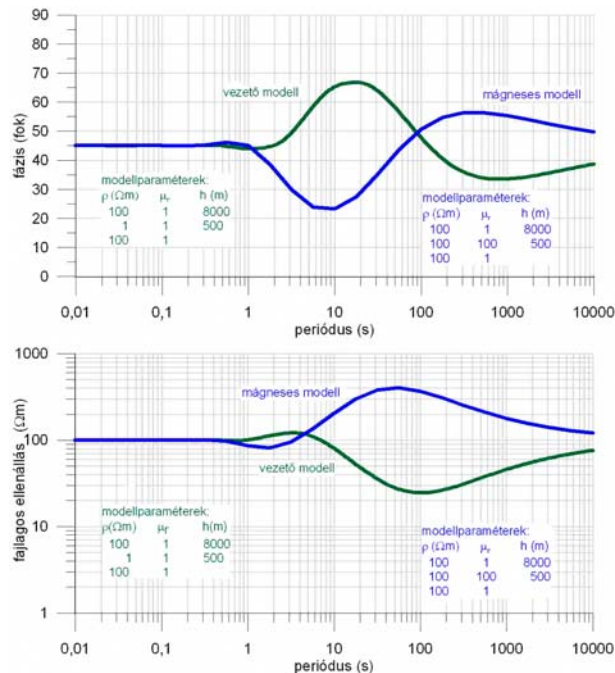
Ahol a relatív mágneses permeabilitás értéke $\mu_r = 1$, ott nyilván sem a fajlagos ellenállás, sem a vastagságparaméter nem fog torzulni. Ahol viszont a $\mu_r \gg 1$, ott az összlet ellenállása és vastagsága is μ_r -szeresére fog megnövekedni.

Mindezekből következően eredeti modellünkben a hagyományos inverzióval elméletileg a 3. táblázatban összefoglalt eredményeket kapjuk:

3. táblázat A hagyományos inverzió után kapott rétegzett modell elméleti paraméterei

Rétegek (j)	$\rho_j^* = \mu_r \rho_j$ [Ωm]	$d_j^* = \mu_r d_j$ [m]
1	1×100	1×8000
2	100×100	100×500
3	1×100	

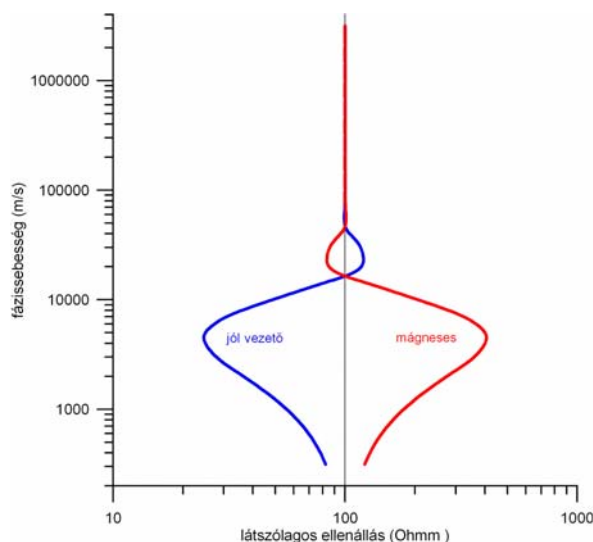
A rétegvastagság látzólagos megnövekedésének oka – amint az a (7) képletekből is látható – a mágneses rétegen belüli rendkívül kicsiny fázissebesség, ugyanis a nagy mágneses permeabilitás gátolja az elektromágneses hullám terjedését.



9. ábra A nagy mágneses permeabilitású és nagy vezetőképességű középső réteg ellentétes előjelű, közel szimmetrikus fajlagos ellenállás- és fázisgörbét eredményez

Figure 9 Magnetotelluric sounding curves (impedance phase and apparent resistivity) for the 1D high-permeability and high-conductivity model

Valamely réteg megnövekedett mágneses permeabilitásának és az ugyanolyan mértékben megnövekedett elektromos vezetőképességének hatása nagyjából egyforma mértékű, de ellentétes előjelű. A fajlagos ellenállásértékek a homogén feltér fajlagos ellenállásértékére, a fázisértékek a



10. ábra A vezető és a mágneses réteg esetén a fázissebesség és a látzólagos ellenállás együttes ábrázolása teljesen szimmetrikus görbét ad

Figure 10 The phase velocities for high-conductivity and high-permeability layers show a perfect symmetry

45°-ra közel szimmetrikusak. (A két görbe csak végtelenül vékony réteg esetén lesz tökéletesen szimmetrikus; 9. ábra.)

Amennyiben az anomális réteg relatív mágneses permeabilitása és elektromos vezetőképessége egyszerre és ugyanolyan arányban nő meg a környezetéhez képest, a réteg elvileg láthatatlanná válik. Amennyiben az anomális (jelen esetben második) réteg nem mágneses, csak a fajlagos ellenállása nagy, hatása – ilyen nagy mélység és ilyen kis vastagság esetén – lényegében észrevehetetlen.

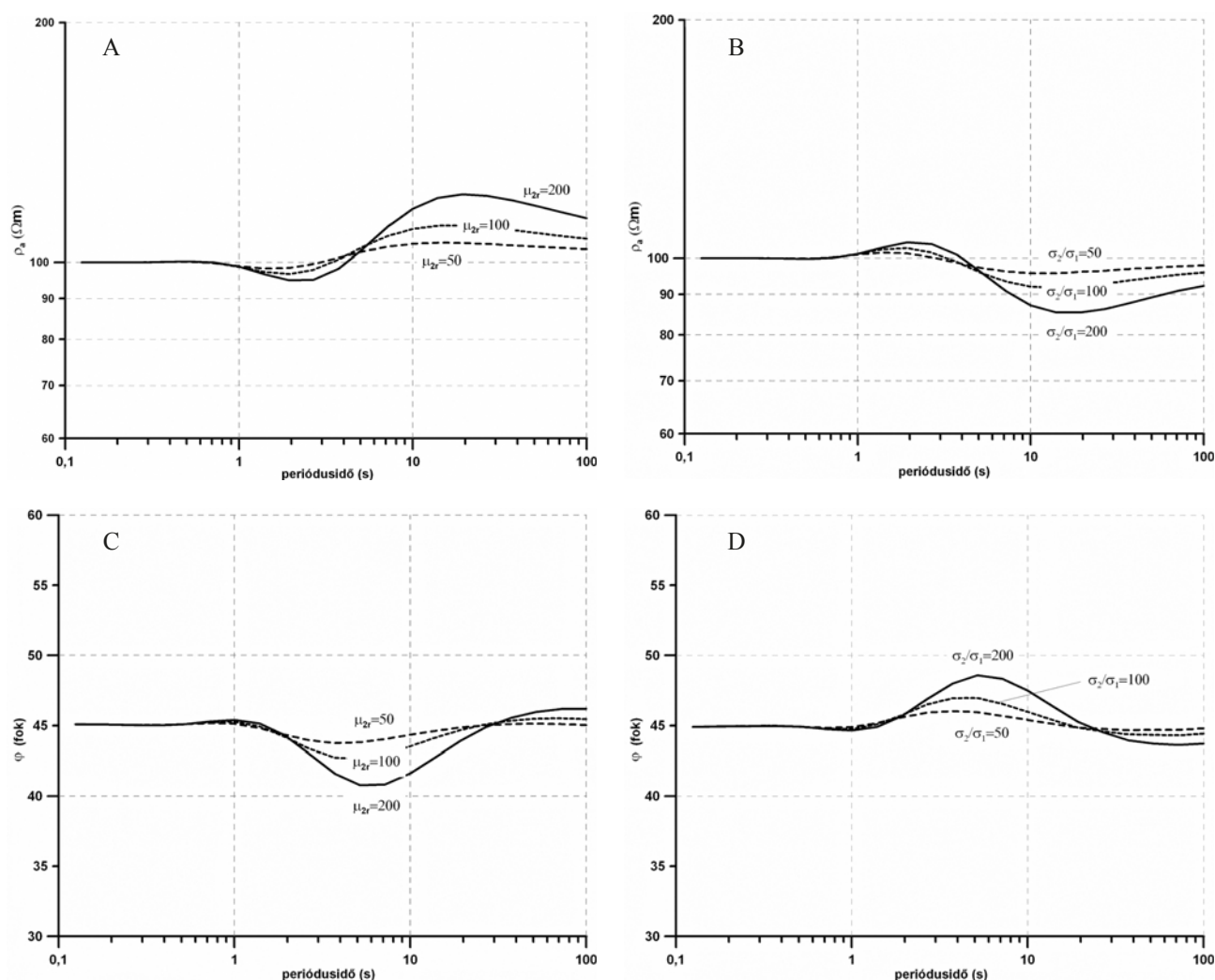
Ugyanerre a modellre kiszámítottuk a fázisbesség és a látszólagos fajlagos ellenállásértékeit. Amint várható volt, a mágneses permeabilitás és a vezetőképesség növekedése a fázisbességet hasonlóan (7), viszont az impedanciát és az ebből számolt látszólagos fajlagos ellenállást ellentétesen (9), (10), (11) változtatja meg. Ez látszik a 10. ábra görbéin is, amelyeken a mágneses réteg és a vezető réteg okozta változások, teljesen szimmetrikusan jelentkeznek.

5.3. Kétdimenziós modellezés

Kétdimenziós modellezés esetén (amikor a modellt az egyik vízszintes irányban lehatárolt) a vízszintes határfelületek mellett függőleges határfelületek is megjelennek, és az ún. E- és H-polarizációban eltérő hatások jelentkeznek.

Kétdimenziós modellszámítási programunkban a mágneses permeabilitás hatását mint változó modell paramétert tudjuk figyelembe venni (Cao et al. 2004, Prácer 2006, Franke et al. 2006). Numerikus eredményeink jó egyezést mutatnak a Rijo (2003) eredményeivel.

Egy 100 Ωm ellenállású homogén feltérben elhelyezett, 1 km széles, 500 m vastag, 10 km mélyen lévő kétdimenziós dákj (*dyke*) felett E- és H-polarizációban is elvégeztük a modellezést. A modellezés során széles tartományban változtattuk a modell mágneses permeabilitását ($\mu_r = 50, 100, 200$) és elektromos vezetőképességét ($\sigma = 50, 100, 200$ S/m,



11. ábra A mágneses permeabilitás és az elektromos vezetőképesség hatása a kétdimenziós modellezési eredményekben: látszólagos fajlagos ellenállás-, valamint a fázisgörbék H-polarizációban (A, C) és E-polarizációban (B és D)

Figure 11 Magnetotelluric sounding curves for models, having “high-permeability and “high-conductivity” 2D embeddings, the resistivity curves and the impedance phase curves in B-polarization (A and C) and in E-polarization (B and D)

azaz $\rho = 2, 1, 0,5 \Omega\text{m}$). Úgy találtuk, hogy a nagy mágneses permeabilitású modell H-polarizációs hatása a nagy vezetőképességű modell E-polarizációs hatásának majdnem tükörképe, ahol a szimmetriatengely a környező közeg fajlagos ellenállásértékénél meghúzott vízszintes egyenes. A szimmetria – az egydimenziós modellezésből már ismert módon – csak vékony réteg esetében tökéletes. A kétdimenziós modellezés néhány eredményét mutatja a 11. ábra (Szarka et al. 2007). A kétdimenziós dákj esetén a mágneses permeabilitásnak E-polarizációban, a nagy vezetőképességnek H-polarizációban nem lesz hatása.

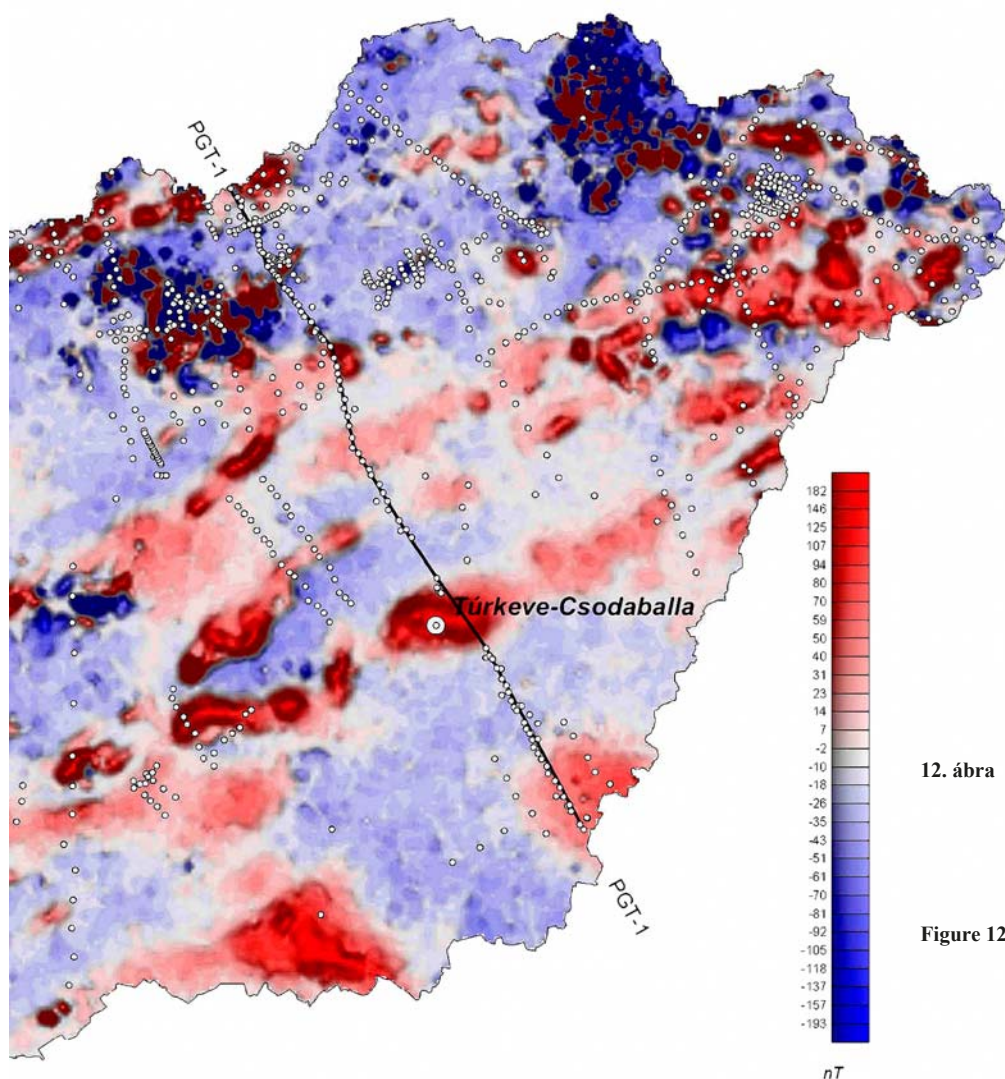
5.4. Háromdimenziós modellezési lehetőségek

A háromdimenziós számítások (az eddigi modellek, mélybeli vékony korong, illetve kocka esetében) különösen az egy-, de még a kétdimenziós modelléhez képest is még $\mu_r = 100$ esetén is nehezen észlelhető anomáliát adnak. A Franke et al. (2006) által kifejlesztett 3D szoftver képes kezelni a mágneses permeabilitás és az elektromos vezetőképesség hatását is. Emlékeztetünk arra, hogy másodrendű

fázisátalakulás esetén μ_r értéke elvileg végtelen lehet, úgyhogy a $\mu_r = 100$ -at sokszorosan meghaladó mágneses permeabilitású háromdimenziós modellek igenis észrevehető magnetotellurikus anomáliával rendelkezhetnek.

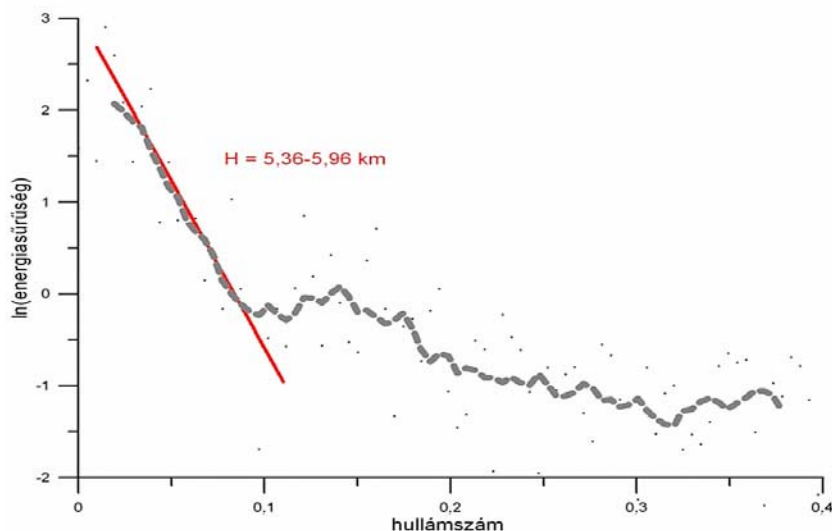
5.5. Terepi esettanulmány

A másodrendű mágneses fázisátalakulás magnetotellurikus diagnosztikája tehát a rendkívül nagy vastagságú és irreálisan nagy fajlagos ellenállású invertált rétegek kimutatása. Elkezdtünk tehát keresgélni ilyen terepi magnetotellurikus görbét. A Pannon Geotraverz-1 (PGT-1) vonalában a Túrkeve-Csodaballa magnetotellurikus pont egy ilyen szondázási görbét ad. A mérési pont egy mágneses anomálián van (12. ábra), amelynek spektrálanalízise 5–6 km-es hatómélységet valószínűsít (13. ábra). Az automatikus, fél-automatikus feldolgozások alapján az 5 km-es mélység a mágneses ható felső peremének mélysége, és a ható a nagyobb mélységben lefelé folytatódik. (Nagy vertikális kiterjedésű mágneses ható alsó peremének kimutatása általában nem lehetséges, mivel a felsőbb részek elnyomják az



12. ábra Magnetotellurikus szondázási pont a Túrkeve-Csodaballa környéki mágneses anomálián, a Pannon Geotraverz-1 (PGT-1) vonalában (MT szondázási pontok fehér körökkel)

Figure 12 Magnetotelluric site near Túrkeve-Csodaballa on the pole-reduced geomagnetic map, along the PGT-1 profile (other MT stations: white circles)



13. ábra | Spektrális mélységbecslés a Túrkeve-Csodaballa környéki pólusra redukált mágneses anomália alapján

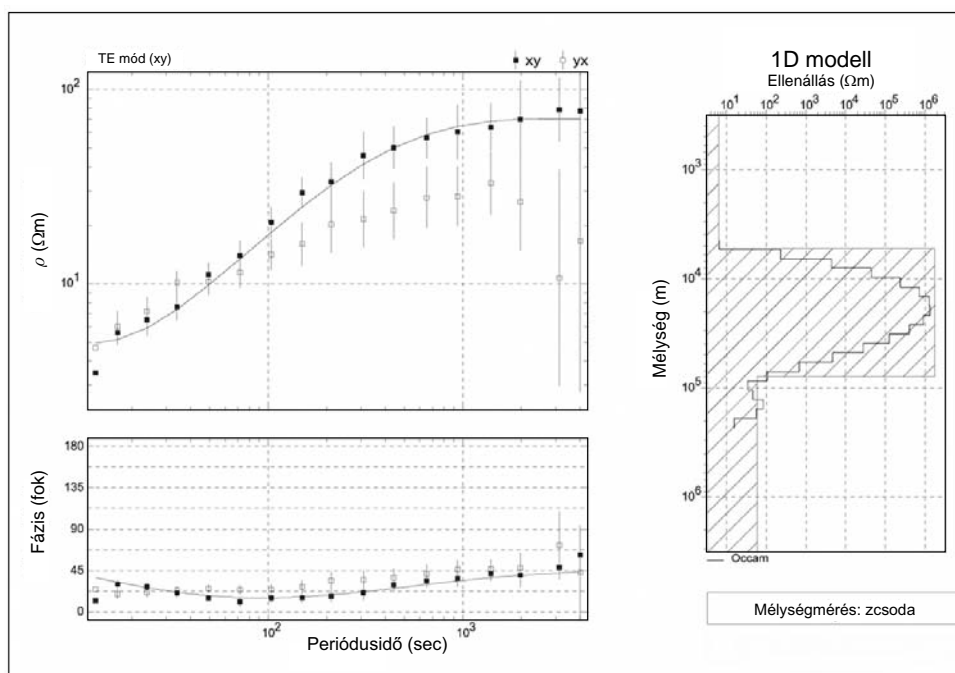
Figure 13 | Spectral depth estimations from pole-reduced geomagnetic data at Túrkeve-Csodaballa

alsó perem hatását.) Ebben a mélységtartományban normál geotermikus adottságok alapján egy, a titanomagnetitre jellemző Curie-hőmérsékletet érünk el.

E pontban a hagyományos magnetotellurikus feldolgozás (a többréteges és az Occam inverzió egyaránt) egy kb. 70 km vastag és rendkívül nagy fajlagos ellenállású ($500\,000\ \Omega\text{m}$ -es) réteget jelez, amelynek teteje 5–6 km-es mélységben valószínűsíthető (14. ábra). Tellurikus vezetőképességi térkép (Madarasi 2006) alapján biztosan állítható, hogy a magnetotellurikus pont környezetében a behatolási mélységig nincs nagy ellenállású (kis vezetőképességű) anomális zóna. Így tehát az inverzióból kapott irreális vastagság- és rendkívül nagy fajlagos ellenállásértékek, másrészt az azonos mágneses és magnetotellurikus hatómé-

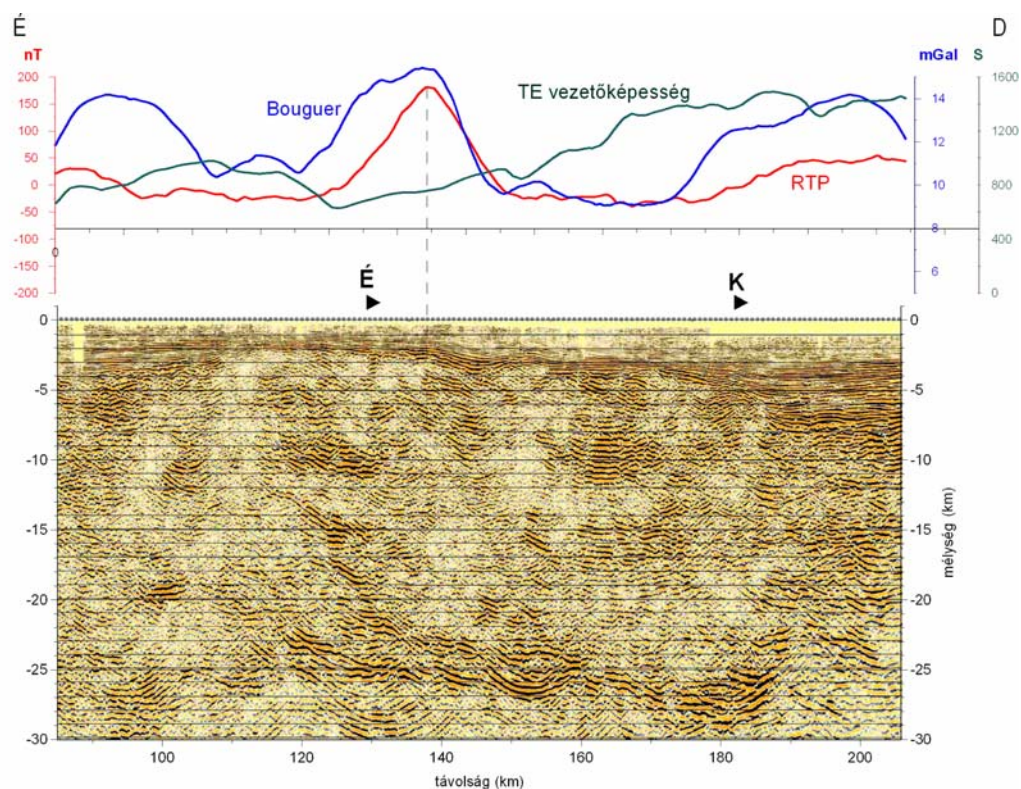
ség nem zárja ki, hogy néhány kilométeres mélységben valóban egy vékony, de erősen mágneses réteg helyezkedik el.

Feltételezve a relatív mágneses permeabilitás jelentős megnövekedését, $\mu_r = 1000$ esetén a réteg feltételezett vastagsága mindössze 70 m lenne, ellenállása pedig $500\ \Omega\text{m}$ -nek adódna, amely értékek teljesen szokásosak. Ez azonban gyökeresen eltér attól a széles körben elfogadott megoldástól (Ádám et al. 1993), amely az inverzióval a hetvenegynéhány km-ben adódó fajlagos ellenállás-csökkenést az asztroszféra mélységével hozza összefüggésbe. A területen az OKGT további MT méréseket is végzett (digitális adatregisztrációs PHOENIX berendezéssel); az adatok felkutatása folyamatban van. További érdekes helyszín lehet a Békésmédenca (Ádám 2008), ahol szintén sikerült több hasonló



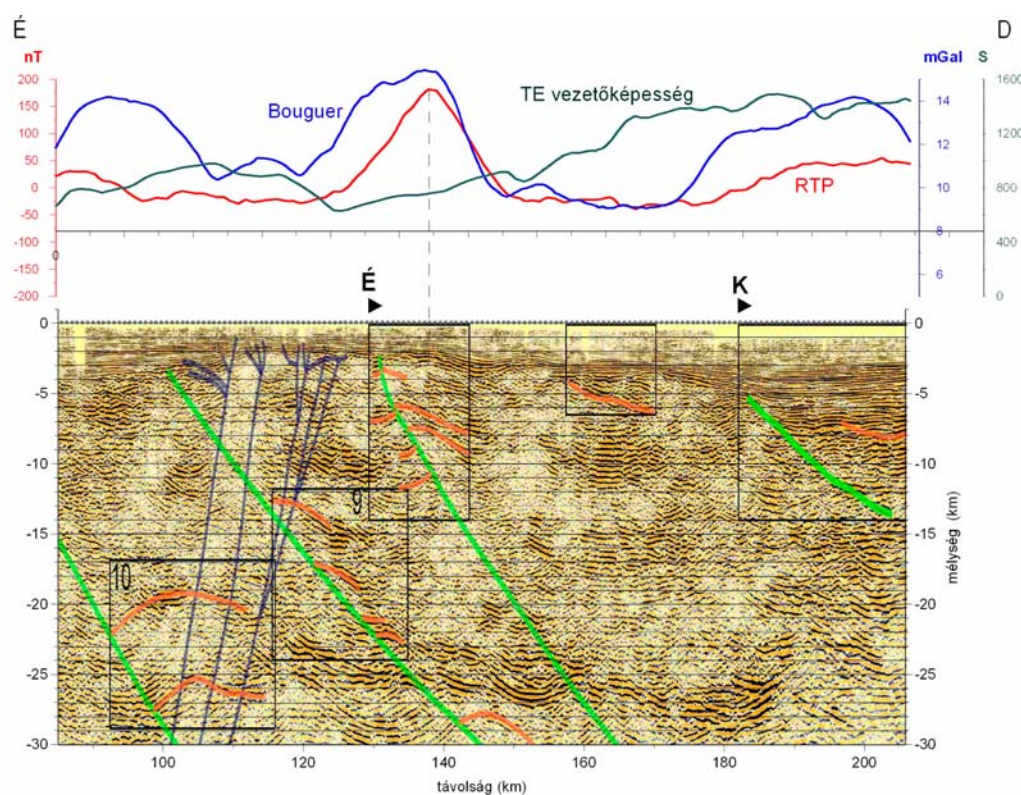
14. ábra | Hagományos magnetotellurikus feldolgozás (Occam inverzió) eredménye

Figure 14 | Results of classical (Occam) inversion of magnetotelluric data



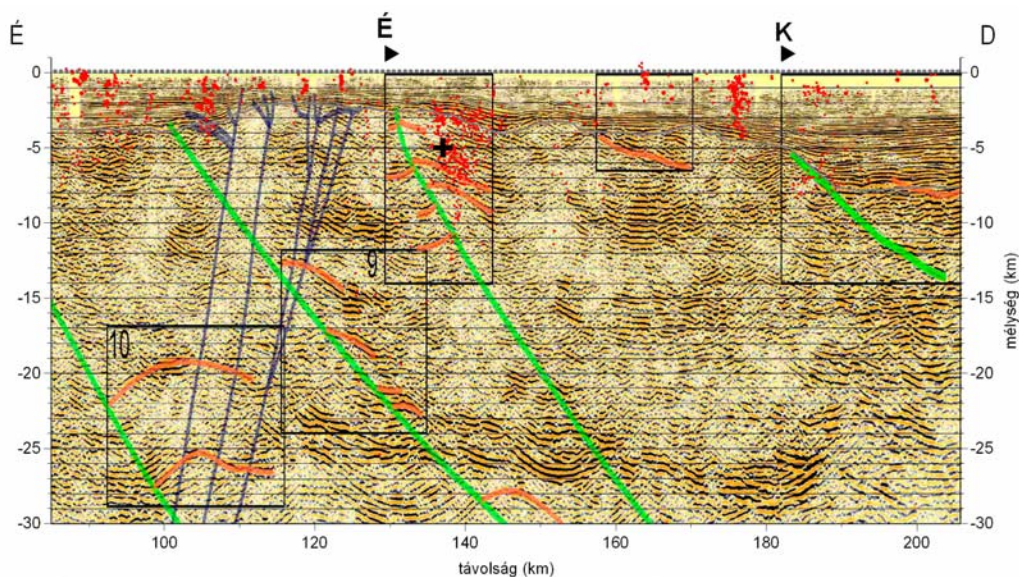
15. ábra | Gravitációs Bouguer-anomália, pólusra redukált mágneses anomália (RTP), tellurikus vezetőképesség-anomália és a PGT–1 szeizmikus reflexiós szelvényen (a túrkeve-csodaballai mágneses anomália szaggatott vonallal jelölve)

Figure 15 | Gravity Bouguer anomaly, pole-reduced magnetic anomaly (RTP), telluric conductance and seismic reflection data along PGT–1 (Túrkeve-Csodaballa magnetic anomaly is shown by dashed line)



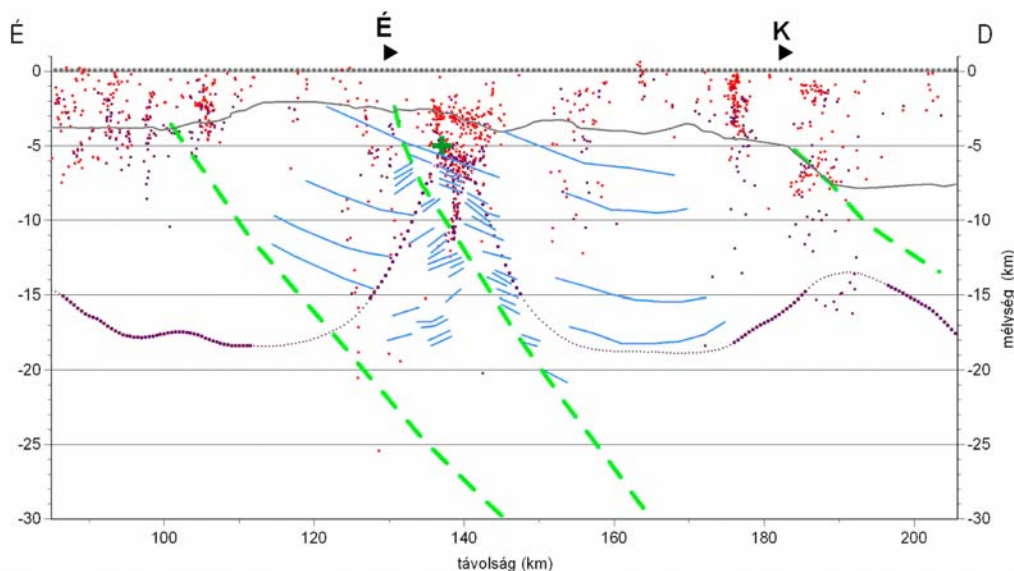
16. ábra | Bouguer-anomália, pólusra redukált mágneses anomália (RTP), tellurikus vezetőképesség-anomália és a PGT–1 szeizmikus szelvény (Posgay et al. (2009) értelmezésével – észak-erdélyi takaró (É), és a Kodru-takaró feltolódási sík (K))

Figure 16 | Bouguer anomaly, pole-reduced magnetic anomaly (RTP), telluric conductance and interpreted (by Posgay et al. 2009) seismic section



17. ábra A ferromágneses anyag tetejének helyzete a mágneses automatikus megoldások (piros pontok) és a magnetotellurikus szondázás (fekete kereszt) kiértékelése alapján, a PGT-1 értelmezett reflexiós szelvényen

Figure 17 The possible location of ferromagnetic material from magnetic automatic depth estimations (red points) from the interpretation of magnetotelluric sounding curve (black +) on the interpreted reflection seismic section



18. ábra A ferromágneses ható tetejének helyzete a mágneses automatikus megoldások (piros, lila pontok) alapján és a magnetotellurikus szondázás nagy ellenállású szintje (zöld kereszt) néhány kiemelt reflexióval (kék vonal) és a Posgay et al.-féle elmozdulási síkok (zöld vonal)

Figure 18 The possible location of the top of ferromagnetic material from magnetic automatic depth estimations (red and violet points) and the top of high resistive body from the interpretation of magnetotelluric sounding (green +) with some special reflections (blue lines) and some nappe structures interpreted by Posgay et al. (green dashed lines)

magnetotellurikus szondázást találni, és ott a mélységértékek inkább a magnetit Curie-mélységéhez esnek közel.

Megvizsgálva a rendelkezésre álló többi geofizikai adatot (15. ábra) a PGT-1 szelvény mentén, megállapítható volt, hogy a reflexiós szeizmikus mérések alapján (Posgay et al. 1995, Posgay et al. 2009) a medencealjzatban (15., 17. ábra) jelentkezik egy olyan elmozdulási zóna, az észak-erdélyi takaró feltolódási vonala (É), amelynek DDK-i oldalán a felboltozódó reflexiók a mágneses és magnetotellurikus

feldolgozásból meghatározott ferromágneses ható helyzetével vannak kapcsolatban. Posgay et al. (2009) értelmezése szerint: „Az elmozdulási zóna környékén a reflektáló felületek a zóna felé emelkednek és közvetlenül a zóna DDK-i részén visszahajlanak”.

A mágneses ható felső pereme gyakorlatilag a medencealjzat felszíne, a legerősebben mágneses rész a mágneses automatikus hatókijelölések alapján 6 km mélységben jól azonosítható (17. ábra: piros pontok, 18. ábra: piros és lila

pontok), és helyzete a magnetotellurikus feldolgozásból kapott – a nagy ellenállású és nagy vastagságú – rétegnek megfelelő szinten jelentkezik (17. ábra: fekete kereszt, 18. ábra: zöld kereszt). A 18. ábra mutatja az észak-erdélyi takaró (É) és a Kodru-takaró feltolódási síkját (K) zöld szaggatott vonalakkal, valamint néhány, kéregbeli, jól reflektáló szintet és a feltolódási vonal mentén kialakuló reflexiókat (kék vonal). Az ábrán látható a reflexiók tetején jelentkező mágneses ható, amelyet az automatikus hatókijelölő (Euler- és Werner-dekonvolúció) eljárások segítségével tudunk pontosan azonosítani. A pszeudogravitációs adatok alapján végzett Cordell-Henderson-mélységinverzió a szelvény ÉNy-i és DK-i részén 15–18 km-es mélységben ad megoldást (18. ábra, lila pontvonal), míg az észak-erdélyi takaró feltolódási vonal mentén a megoldások 6–15 km között jelentkeznek. A mélységinverzió eredménye – meglepően jó összhangban a szeizmikus képpel – olyan határfelületként jelentkezik, amely elkülöníti az erős és gyenge reflexiókkal jelentkező részterületeket.

Az erősen mágneses ható a mágneses és magnetotellurikus geofizikai mérési adatok alapján is 6 km körüli mélységben jelentkezik, amely jóval sekélyebb a magnetit 18 km-es Curie-mélységénél. A mélység alapján a ható egy normál mágneszettségű képződmény is lehetne, de ennek ellentmond a magnetotellurikus szondázási görbe kiértékeléséből kapott irreálisan megnövekedett rétegellenállás és rétegvastagság. Ezek a Hopkinson-effektus jelenlétére utalnak, ami kétféleképpen lehetséges: az egyik szerint a ferromágneses anyag sok titánt tartalmaz, és a titanomagnetit Curie-hőmérséklete (200–600 °C) jóval alacsonyabb, mint a magnetit (600 °C). Másik lehetőségként az merülhet fel, hogy a feltoredezett elmozdulási zóna (feltolódási sík (Posgay et al. 2009)) mentén olyan hőmérséklet-anomália van, amelyet a mélyből felfelé áramló magas hőmérsékletű fluidumok okoznak, amelyeket vízzáró összletek izolálnak a környezettől. Ez a geotermikus hatás megnövelve az adott zóna hőmérsékletét ferromágneses anyagok lokális fázisátalakulását idézi elő. Egy ilyen feltételezés a magyarországi összes nagyszerkezeti vonal mentén megjelenő mágneses anomália eredetére magyarázatot adhat. A ferromágneses anyag, pl. egy bázikus, bazalt-gabbro összetételű kőzet lehet, amely a törérendszerek mentén felszínközelsége miatt.

6. Egyéb fizikai paraméterek viselkedése a mágneses fázisátalakulás során

Egyre több kísérleti eredmény (Jiles 1998) bizonyítja, hogy a másodrendű mágneses fázisátalakuláskor nemcsak a mágneses szuszeptibilitás, hanem pl. a fajhő, a hőtágulási együttható, az összenyomhatósági paraméterek, a rugalmassági állandó, a hangsebesség is jelentős változást szenved. A rugalmassági állandók változása különösen érdekes lehet, mert ez a paraméter a hullámterjedést határozza meg. Nem zárható ki, hogy a mágneses fázisátalakulás szintje szeizmikus diszkontinuitásként is jelentkezik. Vegyük észre, hogy a leggyakoribb mágneses ásvány, a magnetit kritikus 578 °C-os hőmérséklete (minimális és maximális gra-

diens esetén is) a Pannon-medencében éppen a kéreg középső tartományába esik. Ehhez kapcsolódik McKenzie és társai (2010) reológiai kutatása, amely során a kontinentális kéreg földrengéshullámain vizsgálva azt tapasztalták, hogy az 5,5-ös magnitúdójúnál nagyobb rengések minden esetben 600 °C-nál (amely durván a magnetit Curie-hőmérséklete) kisebb hőmérsékletű kéregben jelentkeznek, és ez a kontinentális kéreg rugalmassági tulajdonságának megváltozásával van kapcsolatban.

A Conrad-felülettel, vagyis a gabbro-bazalt összetételű alsó kéreggel való egybevetés a Pannon-medence esetében egyelőre merész gondolat. Kovácsvölgyi a PGT szelvények mentén végzett mágneses feldolgozásaiban (Posgay et al. 1995) már korábban is feltételezte az alsó kéreg jelenlétét; mindenesetre elkezdjük ennek a lehetőségnek a további vizsgálatát.

7. Összefoglalás

A mágneses fázisátalakulás jelenségét a földkéregben elméleti megfontolások és gyakorlati anyagismereti, szilárdtest-fizikai vizsgálatok valószínűsítik. Egyedül köztetfizikai mérésekkel nincsen (még) igazolva. Úgy ítéljük meg, hogy a köztetfizikai laboratóriumokban kialakult mérési gyakorlat (a mintavételezési sűrűség, a felfűtési idő, az alkalmazott mágnesező térerő) egyelőre nem alkalmas a jelenség precíz kimérésére, ezáltal cáfolására sem.

Bemutattuk, hogy a megnövekedett mágneses permeabilitás, amennyiben jelen van, ugyanolyan magnetotellurikus hatást okozhat, mint egy vékony jól vezető réteg, csak ellentétes előjellel. Egy ilyen hatás jellegzetességeit (1: rendkívül nagy vastagságú és irreálisan nagy fajlagos ellenállású réteg, 2: az erősen mágneses réteg magnetotellurikus és mágneses mélységmeghatározásának egyezése) a terepi mérések alapján viszonylag könnyű azonosítani. A valóságban csakugyan találhatók ilyen magnetotellurikus szondázási görbék, ahol a mágneses anomália épp abban a mélységben jelentkezik, ahol egy irreálisan nagy fajlagos ellenállású, rendkívül vastag réteg teteje található.

A kritikus állapotú földi anyagok fizikai tulajdonságai még sok meglepetést tartogathatnak a földkéregkutatás számára.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka az OTKA (NKTH) K68475 témaszámú projekt keretében folyik az ELGI-ben és az MTA–GGKI-ben.

Jegyzetek

^{a)} Az anyag belsejében a $B = \mu H$ igaz, így a CGS rendszerben, mivel $\mu = 1$, a $B = H$. A geomágneses kutatásban hagyományosan a térerősség (CGS-ben oersted) helyett a számban ugyanakkora mágneses indukció (CGS-ben gauss) használatos! Az oerstedből, az A/m dimenziókba (SI rendszer) az átmenetet az 1000-rel való szorzás és 4π -vel való osztás biztosítja. SI rendszerben a térerősség (A/m) és az indukció (Vs/m², azaz tesla)

közötti szorzótényezőt a vákuumbeli mágneses permeabilitás jelenti, amelynek értéke $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Vs/Am.

^{b)} Bár Dunlop (1974) publikációja 20-szoros növekedésről is beszél: „Single domain hematite (0.1–1 micrometer) gave a spectacular Hopkinson peak, with susceptibility enhancement by a factor 20 at 640 °C.”

^{c)} Az AGICO MFK1 műszere már 2–700 A/m külső térerő mellett képes mérni a szuszceptibilitást, kiküszöbölve ezt a problémát!

^{d)} olivin + oxigén = magnetit (vagy hematit) + kvarc

Hivatkozások

- Ádám A., 2008: Keressük a Hopkinson-hatást, azaz a Curie-hőmérséklet közelében történő szuszceptibilitásnövekedést a Pannon-medencében. *Magyar Geofizika* 49/2, 68–74
- Ádám A., Szarka L., Steiner T., 1993: Magnetotelluric approximations for the asthenospheric depth beneath the Békés Graben, Hungary. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity* 45, 761–773
- Cao J., Li X., He Z., 2004: MT inversion including magnetic parameter. 6th China International Geo-electromagnetic workshop, Extended abstracts, 5–8
- Carmichael R. S., 1982: Magnetic properties of minerals and rocks. In: *CRC Handbook of Physical Properties of Rocks*, Vol. 2. Ed.: Carmichael R. S., CRC Press, Boca Raton, Fla., 229–287
- Cracknell A. P., Lorenc J., Przystawa J. A., 1976: Landau's theory of second-order phase transitions and its application to ferromagnetism. *J. Phys. C: Solid State Phys.* 9, 1731–1758
- Dövényi P., Horváth F., Liebe P., Erki I., 1983: Geothermal conditions of Hungary, *Geophysical Transactions* 29/1, 3–114
- Dövényi P., Horváth F., 1988: A review of temperature, thermal conductivity, and heat flow data from the Pannonian Basin. In: *The Pannonian Basin, a Study in Basin Evolution*. Eds.: Royden L. H., Horváth F., American Association of Petroleum Geology, Memoirs 45, 195–233
- Dunlop D. J., 1974: Thermal enhancement of magnetic susceptibility, *J. Geophys.* 40, 439–451
- Dunlop D. J., Özdemir Ö., 2007: Magnetizations of rocks and minerals. In: *Treatise in geophysics*. Volume 5. Ed.: Schubert G., Geomagnetism, Elsevier
- Fowler C. M. R., 2005: *The Solid Earth: An Introduction to Global Geophysics*. Cambridge University Press, New York
- Franke A., Boerner R. U., Spitzer K., 2006: Three-dimensional finite-element simulation of electromagnetic fields using unstructured grids. 18th EMIW, 3-13
- Gould H., Tobochnik J., 2005: *Introduction to Computer Simulation Methods: Applications to Physical Systems*, Ferromagnetic phase transition. <http://www.ibiblio.org/e-notes/Perc/trans.htm>
- Hopkinson J., 1889: Magnetic and Other Physical Properties of Iron at a High Temperature. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 180, 443–465
- Hopkinson J., 1901: Presidential address to the institution of Electrical Engineers (Magnetism), 9th January 1890. In: *Original paper by the late John Hopkinson*, Cambridge at the University Press
- Hrouda F., 2006: Személyes közlés
- Jiles D., 1998: *Introduction to magnetism and magnetic materials*. Taylor and Francis, Boica Raton–London–New York
- Kiss J., Szarka L., Prácser E., 2005a: Second-order magnetic phase transition in the Earth. *Geophysical Research Letters* 32, L24310, doi: 10.1029/2005GL024199
- Kiss J., Szarka L., Prácser E., 2005b: Mágneses fázisátalakulás a Földben. *Magyar Geofizika* 46/3, 102–110
- Kiss J., 2009: Gravitációs és mágneses adatfeldolgozás és modellezés a geokörnyezet megismerése céljából, PhD-értekezés, Nyugat-magyarországi Egyetem
- Kontny A., de Wall H., 2000: The use of low and high $k(T)$ -curves for the characterization of magneto-minerological changes during metamorphism. *Phys. Chem. Earth* 25, 421–429
- Lenkey L., Dövényi P., Horváth F., Cloetingh P. L., 2002: Geothermics of the Pannonian basin and its bearing on the neotectonics, EGU Stephan Mueller Special Publication Series, 3, 29–40
- Logacsov A. A., Zaharov V.H., 1979: Mágneses kutatómódszer, Nyedra Kiadó, Moszkva
- Madarasi A., Nemesi L., Varga G., 2006: Telluric map of East Hungary (M = 1:500000), *Geophysical Transactions* 45/2
- Márton E., 2008: Személyes közlés
- McKenzie D., Jackson J., Priestley K., 2010: The rheology of the oceanic and continental lithosphere, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12, EGU2010-8772, EGU General Assembly
- Petrovský E., Kapička A., 2006: On determination of the Curie point from thermomagnetic curves. *J. Geophys. Res.* 111/B12, 27, doi: 10.1029/2006JB004507
- Posgay K., Bodoky T., Hegedüs E., Kovácsvölgyi S., Lenkey L., Szaifán P., Takács E., Timár Z., Varga G., 1995: Asthenospheric structure beneath a Neogene basin in southeast Hungary, *Tectonophysics* 252, 467–484
- Posgay K., Falus Gy., Kovács I., Kovács A. Cs., Bodoky T., Hegedüs E., 2009: A Tisza nagyszerkezeti egység takaróinak litoszféra méretű vázlata, In: *Magmás és metamorf képződmények a Tiszai Egységben*, GEOLitera, Szeged
- Prácser E., 2006: Modellparaméterek alkalmas megválasztása szelvény menti mérések inverziója során, PhD-értekezés, Miskolci Egyetem
- Radhakrisnamurty C., Likhite S. D., 1970: Hopkinson effect, blocking temperature and Curie point in basalts. *Earth and Planetary Science Letters* 7, 389–396
- Rijo L., 2003: “Magnetic Statics” shift effects on 2-D TE magnetotelluric sounding. In: 8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro 1, 1–6
- Rüdt C., Pouloupoulos P., Babersche K., Blomquist P., Wäppling R., 2002: Curie temperature and critical exponent g in a Fe₂/V₅ superlattice. *SCM 2001, Physical Status Solidi (a)*, 189, 362
- Szarka L., Franke A., Prácser E., Kiss J., 2007: Hypothetical mid-crustal models of second-order magnetic phase transition. 4th International Symposium on Three-Dimensional Electromagnetics Freiberg, Germany, September 27–30
- Szarka L., Kiss J., Prácser E., Ádám A., 2010: The magnetic phase transition and geophysical crustal anomalies. *Chinese Journal of Geophysics* 53/3
- Weaver J. T., 1994: *Mathematical methods for geo-electromagnetic induction*, Research Studies Press, Ltd., Taunton, Somerset, England

Függelék

A j -edik, σ_j elektromos vezetőképességű, d_j vastagságú rétegben ω körfrekvencia, illetőleg $\gamma_j = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma_j}$ komplex hullámszám esetén amennyiben a μ_r mágneses permeabilitás minden rétegben azonos a vákuumével, tehát ha $\mu_r = \mu_0$, a $Z_j(\omega)$ magnetotellurikus impedancia értéke a jól ismert rekurzív képlettel – a legalsó (n -edik) réteg $Z_n(\omega) = \sqrt{i\omega\mu_0/\sigma_n}$ impedanciájából kiindulva – a következő alakú:

$$\begin{aligned} Z_j(\omega) &= \frac{i\omega\mu_0}{\gamma_j} \times \frac{(\gamma_j / (i\omega\mu_0))Z_{j+1}(\omega) \operatorname{cth}(\gamma_j d_j) + 1}{(\gamma_j / (i\omega\mu_0))Z_{j+1}(\omega) + \operatorname{cth}(\gamma_j d_j)} \\ &= \frac{i\omega\mu_0}{\gamma_j} \operatorname{cth}\left(\gamma_j d_j + \operatorname{arcth}\left(\frac{\gamma_j}{i\omega\mu_0} Z_{j+1}(\omega)\right)\right). \end{aligned} \quad (\text{F1})$$

Amennyiben a mágneses permeabilitás (μ_j) is rétegfüggő, akkor $Z_n(\omega) = \sqrt{i\omega\mu_n/\sigma_n}$, és a rekurzív képletben a j -edik réteg impedanciája:

$$\begin{aligned} Z_j(\omega) &= \frac{i\omega\mu_j}{\gamma_j} \times \frac{(\gamma_j / (i\omega\mu_j))Z_{j+1}(\omega) \operatorname{cth}(\gamma_j d_j) + 1}{(\gamma_j / (i\omega\mu_j))Z_{j+1}(\omega) + \operatorname{cth}(\gamma_j d_j)} \\ &= \frac{i\omega\mu_j}{\gamma_j} \operatorname{cth}\left(\gamma_j d_j + \operatorname{arcth}\left(\frac{\gamma_j}{i\omega\mu_j} Z_{j+1}(\omega)\right)\right). \end{aligned} \quad (\text{F2})$$

Az (F2) képletben a közegparaméterek kizárólag az $i\omega\mu_j/\gamma_j$ és $\gamma_j d_j$ kombinációkban fordulnak elő. A rétegenkénti két információ kizárja, hogy a közegek σ_j elektromos vezetőképessége, μ_j mágneses permeabilitása és d_j vastagsága – az inverzió típusától függetlenül – külön-külön meghatározható legyen. Ami végül meghatározható az inverzió során, az:

- 1) a relatív mágneses permeabilitás és a fajlagos ellenállás szorzata, $\mu_j \rho_j$, valamint
- 2) a relatív mágneses permeabilitás és a rétegvastagság szorzata, $\mu_j d_j$.

Sorfejtéses inverzió III – Gerjesztett polarizációs adatok inverziós feldolgozása

TURAI ENDRE¹, DOBRÓKA MIHÁLY^{1,2}, HERCZEG ÁDÁM¹

¹Miskolci Egyetem, Geofizikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

²MTA–ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport, 3515 Miskolc-Egyetemváros

A jelen dolgozat egy cikksorozat része, amelyben a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén kifejlesztett sorfejtéses inverziós módszeren alapuló adatfeldolgozási/értelmezési eljárásokat mutatjuk be. Az első dolgozatban a Fourier-transzformációt újszerű megközelítésben inverz feladatként tárgyaltuk úgy, hogy a frekvenciaspektrumot sorfejtéssel közelítettük, inverziós változóknak a sorfejtési együtthatókat tekintve. A második dolgozatban a sorfejtéses inverzió módszerét a mélyfúrás geofizikai adatok feldolgozására alkalmaztuk oly módon, hogy a petrofizikai paramétereket – mint a mélység függvényeit – sorfejtéssel közelítettük, a sorfejtési együtthatókat az inverziós eljárás keretében állítottuk elő. Folytatva az alkalmazási lehetőségeket, ebben a cikkben – általunk kidolgozott, új eljárásként – a gerjesztett potenciáladatok (GP) inverziós feldolgozását mutatjuk be. Az eljárás kiindulópontja a GP időállandó-spektrumainak sorfejtéses közelítése azáltal, hogy a sorfejtés együtthatóit inverzió keretében állítjuk elő.

A cikkben röviden bemutatjuk a GP-mérési módszert, a sorfejtéses inverzió alkalmazását a GP-mérési görbék TAU-transzformációjának egzakt előállítására, valamint bevezetünk egy, a szennyezettség mértékének és típusának becslésére alkalmas eljárást.

A környezetvédelmi problémák megoldása során a fémes, fém-sós, a kémiai redox szennyezések, valamint a diszperz agyagtartalom kimutatására, kommunális hulladéklerakók és vízbázisok vizsgálatára alkalmaztuk eredményesen a módszert. Ezek közül mutatjuk be néhány újabb terepi mérés inverziós feldolgozásának eredményeit.

Turai, E., Dobróka, M., Herczeg, Á.: Series expansion based inversion III – Procedure for inversion processing of induced polarization (IP) data

The present paper is a part of a series of articles in which we publish new data processing and interpretation procedures based on a series expansion inversion technique developed by the Department of Geophysics, University of Miskolc. In the first paper „Fourier transform as an inverse problem” was published in this journal which, following a novel way, the frequency spectra were approximated by series expansion considering the expansion coefficients as inversion variables. In the second paper, series expansion inversion method was applied to borehole geophysical data processing in such a way that petrophysical parameters were approximated as series expansions of deep function, the expansion coefficients computed by an inversion procedure.

Now as a continuation, a new procedure for the inversion processing of induced polarization (IP) data developed by the Department of Geophysics, University of Miskolc is presented. The origin of this procedure is the series expansion approximation of IP time-constant spectra in such a way that series expansion coefficients were computed by an inversion procedure.

The paper shortly presents the IP measuring method and the inverse solutions of TAU-Transform of the Time-Domain IP curves. A procedure for estimation of the type and the value of soil contaminations will be introduced.

The calculation of contamination type comes from the time-constant value of the time-constant spectra. The value estimation of the soil contamination is based on the waited amplitude values of the time-constant spectra.

This method was successfully applied among solving environmental problems for detection metallic, metallic salted and chemical (redox) contaminations as well as for detection disperse clay content and for examination communal waste sites and water-base areas. The paper presents the inverse processing results of some newer field measuring data from these.

Beérkezett: 2010. augusztus 31.; *elfogadva:* 2010. szeptember 14.

Bevezetés

A GP- (angol szakirodalomban: IP – *Induced Polarization*) módszert az 1950-es évektől kezdve mind az idő-, mind pedig a frekvenciatartományban eredményesen alkalmazták

az ércutatásban (Wait 1959; Keller, Frischknecht 1966; Sumner 1976).

A módszer időtartományban mérhető – szigorúan monoton csökkenő – látszólagos polarizálhatósági görbéje ($\eta_a(t)$) az alábbi integráltranszformációval írható le (Turai 1981):

$$\eta_a(t) = \int_0^\infty w(\tau) \exp(-t/\tau) d\tau, \quad (1)$$

ahol t a gerjesztés kikapcsolásától eltelt idő, τ a polarizáció időállandója, $w(\tau)$ az időállandó-spektrum, amelyre vonatkozóan megköveteljük az

$$\int_0^\infty w(\tau) d\tau = 1$$

normálási feltétel teljesülését.

Az időállandó-spektrum tartalmazza az IP-mérés polarizációra vonatkozó összes információját (Turai 1985) ezért meghatározása még akkor is alapvetően fontos, ha a GP-jelenség leírására nincs közfizikai modellünk.

Nevezzük TAU-transzformációnak (Turai 1981) az (1) összefüggés inverzét,

$$w(\tau) = \text{TAU}[\eta_a(t)], \quad (2)$$

amelynek segítségével a mért látszólagos polarizálhatósági görbékhez tartozó időállandó-spektrumokat határozhatjuk meg. A TAU-transzformáció analitikusan nem oldható meg. Közelítő megoldására Turai (1985) polinomos interpolációs, ill. Fourier-transzformációs módszereket dolgozott ki. Általános megoldás a sorfejtéses inverzió keretében adható meg (Turai, Dobróka 2001) amelyet az alábbiakban részletesen bemutatunk.

A GP-adatok TAU-transzformációs értelmezését az 1990-es évektől kezdve számos esetben (Offheim – 1992, Nyékládháza – 1997, Ráckeve – 1997, Kecskemét – 1997, Győröcske – 1999, Pásztó – 2000, Tokaj – 2001, Balmazújváros – 2002, Szerencs – 2004) eredményesen használtuk a szennyezett területek lehatárolásánál és a szennyezettségük minősítésénél.

A TAU-transzformáció megoldása sorfejtéses inverzióval

A $w(\tau)$ időállandó-spektrum folytonos valós függvény, véges számú mérési adatból csak véges pontossággal ismerhető meg. Első lépésként tehát véges adattal való leírásáról kell gondoskodnunk, azaz diszkrétizálnunk kell. Írjuk fel a $w(\tau)$ időállandó-spektrumot alkalmasan választott bázisfüggvények szerinti sorfejtés formájában

$$w(\tau) = \sum_{q=1}^Q B_q \Phi_q(\tau), \quad (3)$$

ahol Φ_q a q -ik bázisfüggvény, B_q sorfejtési együttható. Mivel a bázisfüggvények ismertek, az időállandó-spektrum előállítása az ismeretlen sorfejtési együtthatók meghatározására egyszerűsödik.

Ha a TAU-transzformációt inverz feladatként definiáljuk, akkor a B_q sorfejtési együtthatók \mathbf{B} vektora az ismeretlen modellparaméter-vektor, az (1) egyenlet a direkt feladatot megoldó válasz egyenlet, amely a (3) egyenlettel kombinálva a t_k mérési időpontra a

$$\begin{aligned} \eta(t_k) &= \eta_k = \int_0^\infty \sum_{q=1}^Q B_q \Phi_q(\tau) \exp(-t_k/\tau) d\tau \\ &= \sum_{q=1}^Q B_q \int_0^\infty \Phi_q(\tau) \exp(-t_k/\tau) d\tau \end{aligned} \quad (4)$$

összefüggést adja. Bevezetve az

$$S_{kq} = \int_0^\infty \Phi_q(\tau) \exp(-t_k/\tau) d\tau \quad (5)$$

jelölést, a számított adatokat az

$$\eta_k^{\text{calc}} = \sum_{q=1}^Q B_q S_{kq} \quad (6)$$

lineáris kifejezéssel állíthatjuk elő, vagy mátrix írásmódban:

$$\boldsymbol{\eta}^{\text{calc}} = \mathbf{S} \mathbf{B}.$$

Bevezetjük a mért és számított látszólagos polarizációs adatok eltérésvektorát:

$$\mathbf{e} = \boldsymbol{\eta}^{\text{obs}} - \boldsymbol{\eta}^{\text{calc}}. \quad (7)$$

A TAU-transzformációs probléma inverz feladatként fogalmazható meg. Ha a diszkrétizációt megfelelő módon végezzük, elérhető, hogy a mérési adatok száma meghaladja a sorfejtési együtthatók számát. Ekkor az inverz feladat túlhatározott, megoldását a (6) eltérésvektor (L_2) normájának minimalizálásával állíthatjuk elő. Ez a legkisebb négyzetek módszere, amely (lineáris inverzió esetén) az ismert

$$\mathbf{S}^T \mathbf{S} \mathbf{B} = \mathbf{S}^T \boldsymbol{\eta}^{\text{obs}}.$$

normálegyenlet-rendszerre vezet. Az egyenletrendszert megoldva

$$\mathbf{B} = (\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T \boldsymbol{\eta}^{\text{obs}}$$

a mérési adatok alapján előállított sorfejtési együtthatókkal, a $w(\tau)$ időállandó-spektrum (3) alapján számítható.

A Φ_q bázisfüggvények alkalmas megválasztása a feladattól függ. Általános esetben (numerikus szempontból) hasznos lehet a Legendre-polinomok szerinti sorfejtés. A környezetgeofizikai alkalmazásokban fontos szerepet kapnak az intervallumon konstans függvények, mivel a gyakorlatban fontos időállandó-tartomány viszonylag szűk, így (az alábbiak szerint) elegendő mindössze négy intervallumra osztani. Ekkor a τ_q körüli, 2Δ kiterjedésű intervallumon a bázisfüggvényt így választhatjuk:

$$\Phi_q(\tau) = \begin{cases} 1, & \text{ha } |\tau - \tau_q| \leq \Delta, \\ 0 & \text{egyébként,} \end{cases}$$

amellyel a (6) mátrixelemek analitikusan számíthatók. Előnye az ilyen diszkrétizálásnak, hogy a sorfejtési együtthatók ekkor közvetlenül az adott intervallumban érvényes (konsztans) időállandóspektrum-értéket adják meg. A (4) egyenletet ekkor a könnyen számítható

$$\eta_k = \sum_{q=1}^Q B_q \int_{\tau_q - \Delta}^{\tau_q + \Delta} \exp(-t_k/\tau) d\tau$$

alakban adhatjuk meg.

A GP-módszer korábbi gyakorlatához illeszkedik a Dirac-féle delta-függvények szerinti sorfejtés, amely az ún. „vonalas” időállandó-spektrum leírására alkalmas (Turai, Dobróka 2001). A (3) egyenlet ekkor így írható:

$$w(\tau) = \sum_{q=1}^Q B_q \delta(\tau - \tau_q),$$

ahol τ_q a q -edik diszkrét polarizációs mechanizmushoz tartozó időállandó. A direkt feladatot megfogalmazó (4) egyenlet,

$$\eta(t_k) = \eta_k = \sum_{q=1}^Q B_q \int_0^\infty \delta(\tau - \tau_q) \exp(-t_k/\tau) d\tau,$$

amely a Dirac-delta integrációs tulajdonsága miatt így is írható:

$$\eta_k = \sum_{q=1}^Q B_q \exp(-t_k/\tau_q),$$

ahonnan láthatjuk, hogy a sorfejtési együtthatók jelentése az adott τ_q időállandóhoz tartozó spektrális amplitúdó.

Az inverziót általános esetben és a fenti speciális esetekben egyaránt végezhetjük lineáris vagy globális eljárással is. Az utóbbi választásra példaként a Monte-Carlo-módszer alkalmazását mutatjuk be.

A TAU-transzformáció inverziós megoldása Monte-Carlo-eljárással

A gerjesztett polarizációs mérés során az $\eta(t)$ görbét mérjük diszkrét időpontokban. A közege a τ időállandóhoz tartozó spektrális amplitúdó hordoz információt. Az amplitúdó-spektrumra vonatkozó fontos feltétel:

$$\int_0^\infty w(\tau) d\tau = 1,$$

vagy diszkretizáció után

$$\sum_{q=1}^Q w_q = 1.$$

A (τ, w) modellparaméterek Monte-Carlo-módszer szerinti generálása előtt meg kell határozni, hogy hány komponens, azaz hányféle típusú polarizáció hatását keressük az adatrendszerünkben. Vizsgálatainkban négy komponensre történő inverziót végeztünk ($Q = 4$), a direkt feladatot a fentiekben bemutatott Dirac-féle delta-függvénnyel diszkretizált formában írtuk fel (a sorfejtési együtthatók ekkor egyszerűen a spektrális amplitúdók). A négy (τ, w) -pár generálása után a számított görbének a mért görbéhez való optimális illeszkedését a mért és a számított polarizálhatósági görbék L_2 normájának a minimuma jelöli ki:

$$\min \|e\|_2 = \min \sqrt{\frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} \left(\frac{\eta_{\text{obs}}(t_i) - \eta_{\text{calc}}(t_i)}{\eta_{\text{obs}}(t_i)} \right)^2},$$

ahol η_{obs} a mért adatokból előálló polarizálhatósági görbe, η_{calc} a Monte-Carlo-módszerrel generált adatokból számított polarizálhatósági görbe, N_t a mérési időpontok száma. A mérést az IRIS SYSCAL 72 csatornás műszerrel végeztük, amely teljes, 72 elektródából álló terítés, és Wenner-elektroda-elrendezés esetén 744 pontban, s minden vonatkozási pontban, $N_t = 20$ időpillanatban méri a GP-adatot. Az illesztést minden térbeli mérési pontra végre kell hajtani. A bemutatott szelvények esetén az algoritmus a minimális hibával illeszkedő számított görbét keresi oly módon, hogy 100 000 véletlenszerűen generált görbét ellenőriz. Amennyiben nem talál köztük 1%-nál kisebb eltéréssel illeszkedőt, akkor ismét 100 000 görbét számít ki újra véletlenszerűen generált paraméterekkel, és az elfogadási hibahatárt 1%-

kal növeli. Ezt a hibahatár-növelést és újragenerálást addig folytatja, míg nem talál az aktuális hibahatáron belül illeszkedő, számított lecsengési görbét. Az egész adatrendszerre kalkulált átlagos hiba a példaként bemutatandó terepi adatrendszer esetén 6,15%. Végeredményként a legjobb illeszkedésű számított görbe komponenseinek w és τ értékeit tároljuk el táblázatos formában, minden térbeli mérési vonatkoztatási ponthoz, és ezekből az időállandók ismeretében, azok amplitúdóját felhasználva szerkesztünk szelvényeket, ezzel ábrázolva az egyes komponensek hatását. (Az említett 100 000-es érték természetesen tetszőlegesen változtatható, de a tapasztalat szerint ennek jelentős növelésével már nem érhető el lényegesen jobb eredmény, ennél kevesebb próbálkozás azonban nagy eséllyel rontja az inverzió eredményét. Ezt támasztja alá az is, hogy többszöri futtatás után az adatrendszerre számolt átlagos hiba értéke közelítőleg mindig ugyanannyi, habár a számított adatokból szerkesztett szelvények minimálisan eltérhetnek egymástól.)

Fontos kikötésként alkalmaztuk, hogy a terepi $\eta(t)$ lecsengési görbének szigorúan monoton csökkenőnek kell lennie. Ezenkívül nem engedjük meg a görbe negatív tartományba való átcusúsását sem. Mindkét kikötés meglehetősen szigorú, ami az adatrendszer zajosságát nagyban csökkenti, de jelentős adatvesztéssel is járhat, ugyanis a kikötéseknek nem megfelelő térbeli mérési pontokat kizártuk. Ezzel együtt az eljárás gyakorlati felhasználásra alkalmasnak bizonyult.

A szennyezettség mértékének és típusának becslésére szolgáló eljárás

A terepi mérések feldolgozásával kapott időállandó-spektrumok alapján az időállandók növekedésével a filtrációs, a membrán, a redox és a fémes polarizációk különíthetők el egymástól. Az időállandó-értékek eloszlása alapján a polarizáció típusa becsülhető (Turai 2004), melynek földtani okait az 1. táblázat mutatja. A filtrációs polarizáció elektromosan vezető fluidumot tartalmazó porózus talajokban és kőzetekben, a membránpolarizáció diszperz agyagtartalom jelenlétében, a redox polarizáció oxidációt illetve redukciót okozó szennyezőanyagok esetén, míg a fémes (metallikus) polarizáció fémesen vezető talajkomponensek megjelenésekor lép fel.

1. táblázat | A polarizáció típusa és a polarizáció földtani okai

A polarizáció típusa	A polarizáció földtani okai
filtrációs polarizáció	Elektromosan vezető fluidumot tartalmazó porózus talajok és kőzetek
membránpolarizáció	Diszperz agyagot és vizet tartalmazó porózus talajok és kőzetek
redox (elektrokémiai) polarizáció	Oxidatív vagy redukzív hatású kémiai szennyezések
fémes (elektroda-) polarizáció	Fémesen vezető anyagok ionosan vezető fluidumot tartalmazó kőzetekben

A veszélyes környezetszennyezések okozta redox és fém-polarizációk nagyobb időállandókkal ($\tau > 1$ sec), míg a kevésbé veszélyes filtrációs és membránhatások kisebb időállandókkal ($\tau < 1$ sec) jelentkeznek, ezért a szennyezések fokának a jellemzésére bevezettük (Turai 2004) az időállandóval súlyozott amplitúdóértéket (WAV – *Weighted Amplitude Value*), amely a veszélyesebb polarizációk amplitúdóját megnöveli, a kevésbé veszélyes polarizációk súlyát pedig csökkenti:

$$\text{WAV} = \tau \cdot w(\tau).$$

Az újabb terepi mérések közül a tiszapalkonyai zagytározó esetében végzett szennyezettségi elemzéseket teljes körűen a IV. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencián (Turai et al. 2008) mutattuk be.

A korábbi terepi mérések adatainak újrafeldolgozása mellett több szennyezett területen (Nyékládháza – 2006, Berekbőszörmény – 2007, Nagytétény – 2008, Darvastó – 2008, Nagytárcsán – 2008, Miskolc-Hejőpart – 2008, Miskolc-Bedő-hegy – 2009) új terepi méréseket is végeztünk.

Ezek az eredmények igazolták, hogy a polarizációs szennyezettség mértékének a becslésére az időállandóval súlyozott amplitúdóspektrum-érték (WAV) minden mérési területen alkalmas volt. A szennyezettség okáról megállapítható, hogy a kisebb időállandóval ($\tau < 1$ sec) jelentkező komponensek a környezetszennyezés szempontjából veszélytelen filtrációs és membránpolarizációkhoz köthetők, melyeket a talaj elektromosan vezető fluidumtartalma, valamint a diszperz agyagtartalma okoz. A környezetszennyezés szempontjából veszélyes elektrokémiai és fém-hatások okozta

redox és metallikus (elektróda-) polarizációk viszont nagyobb időállandójú ($\tau > 1$ sec) komponensekkel jelentkeznek. Az előzők alapján tehát a környezeti szennyezés szempontjából veszélyesebb redox és fém-szennyezések által érintett térrészek lehatárolhatók.

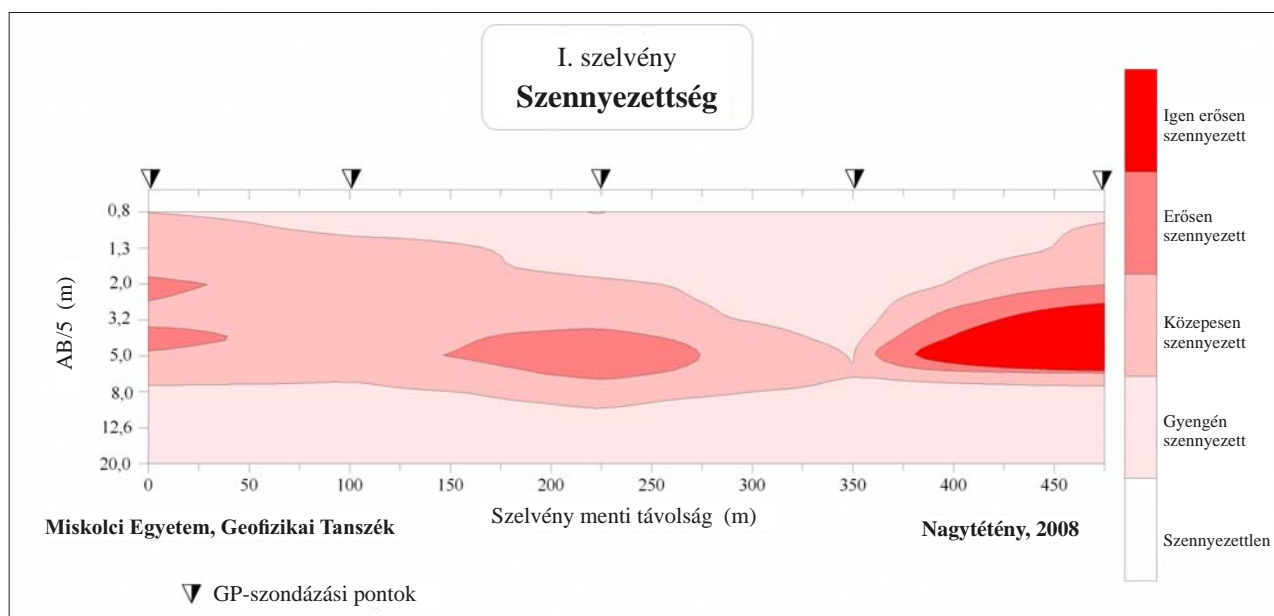
Bevezettük továbbá az időállandó-spektrum ($w(\tau)$) és a fajlagos elektromos vezetőképesség (σ) szorzataként a korrigált elektromos vezetőképességet (σ_{corr}):

$$\sigma_{\text{corr}} = \sigma \cdot w(\tau).$$

Ennek a korrigált vezetőképességnek a terepi mérések eredményeiből számított 100 mS/m értéktől nagyobb tartománya szintén alkalmas az erősen szennyezett térrészek lehatárolására (Turai et al. 2008).

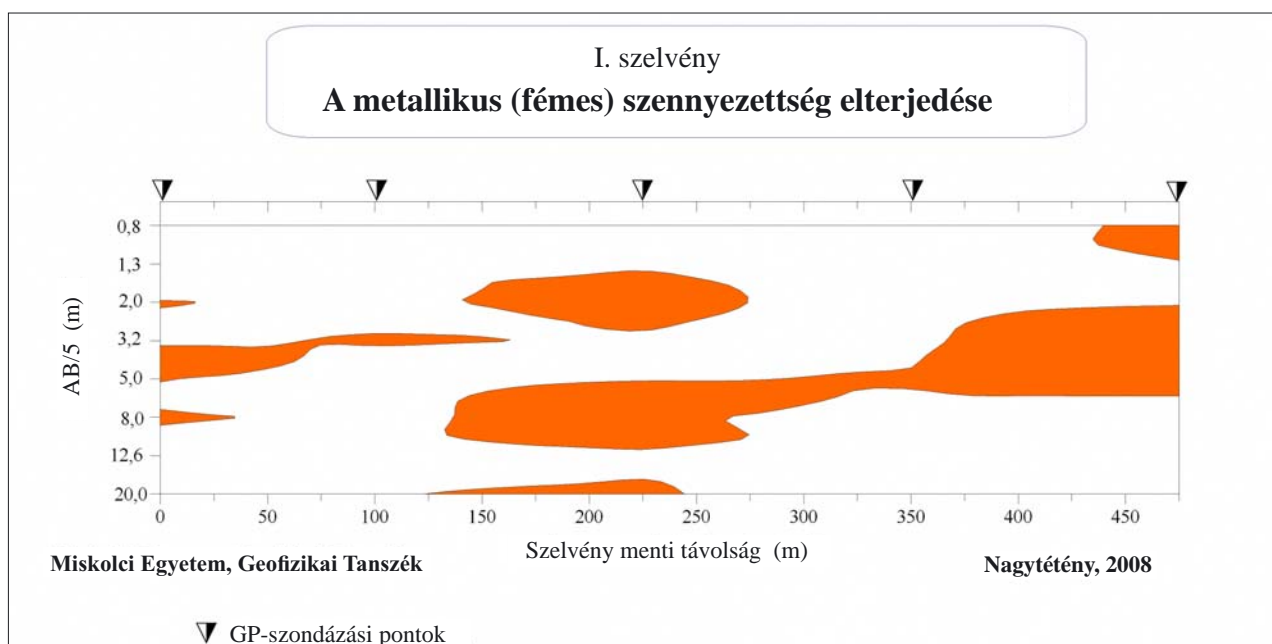
Néhány terepi mérés feldolgozásának eredménye

A nagytétényi kommunális hulladéklerakó felett 2008. júliusában mért IP-mérések TAU-transzformációjának az eredményeiből mutatjuk be az 1. szelvény menti kiértékelést a következőkben. Az 1. ábrán a TAU-transzformáció után kapott WAV-értékek alapján becsült szennyezettség vertikális metszete látható. Az ábra azt mutatja, hogy a vizsgált hulladéklerakónál igen erős szennyezés is fellép. Az időállandó-értékek alapján megállapítható, hogy a polarizációt főként a fém-, fém-sós (2. ábra) szennyezettség okozta a diszperz agyagos (3. ábra) és a redox (4. ábra) hatások mellett.



1. ábra Nagytétényi kommunális hulladéklerakó felett számított WAV-metszet (szennyezetlen: WAV < 2%, gyengén szennyezett: 2% < WAV < 5%, közepesen szennyezett: 5% < WAV < 10%, erősen szennyezett: 10% < WAV < 20%, igen erősen szennyezett: WAV > 20%)

Figure 1 Vertical WAV section calculated over a communal waste site near Nagytétény (non-contaminated: WAV < 2%, less contaminated: 2% < WAV < 5%, middle contaminated: 5% < WAV < 10%, highly contaminated: 10% < WAV < 20%, very highly contaminated: WAV > 20%)



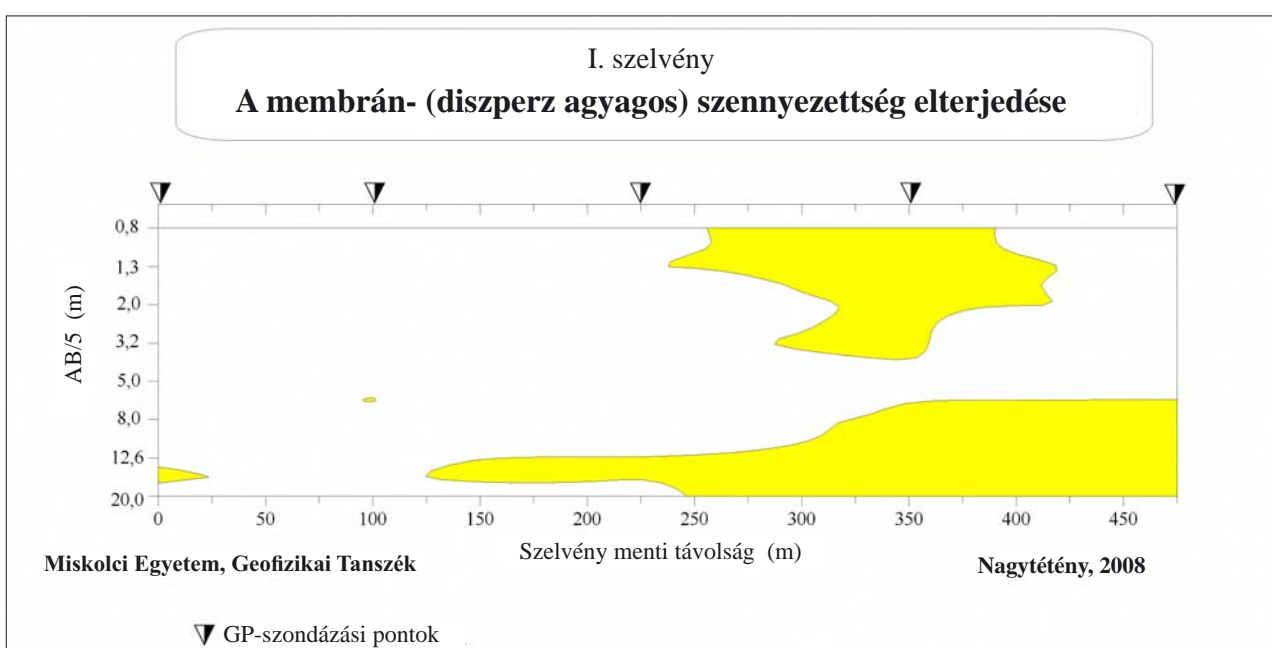
2. ábra | A fémes polarizáció elterjedésének vertikális metszete a nagytétényi kommunális hulladéklerakó esetén ($\tau > 1,0$ sec)

Figure 2 | Vertical section of metallic polarization over the Nagytétény communal waste site (time constants are higher than 1 second)

Az 5. ábrán a nagytétényi, a 6. ábrán pedig a berek-böszörményi hulladéklerakó esetében számított korrigált vezetőképesség vertikális metszetét mutatjuk be, bejelölve a metszeteken a 100 mS/m értékű határvonalat.

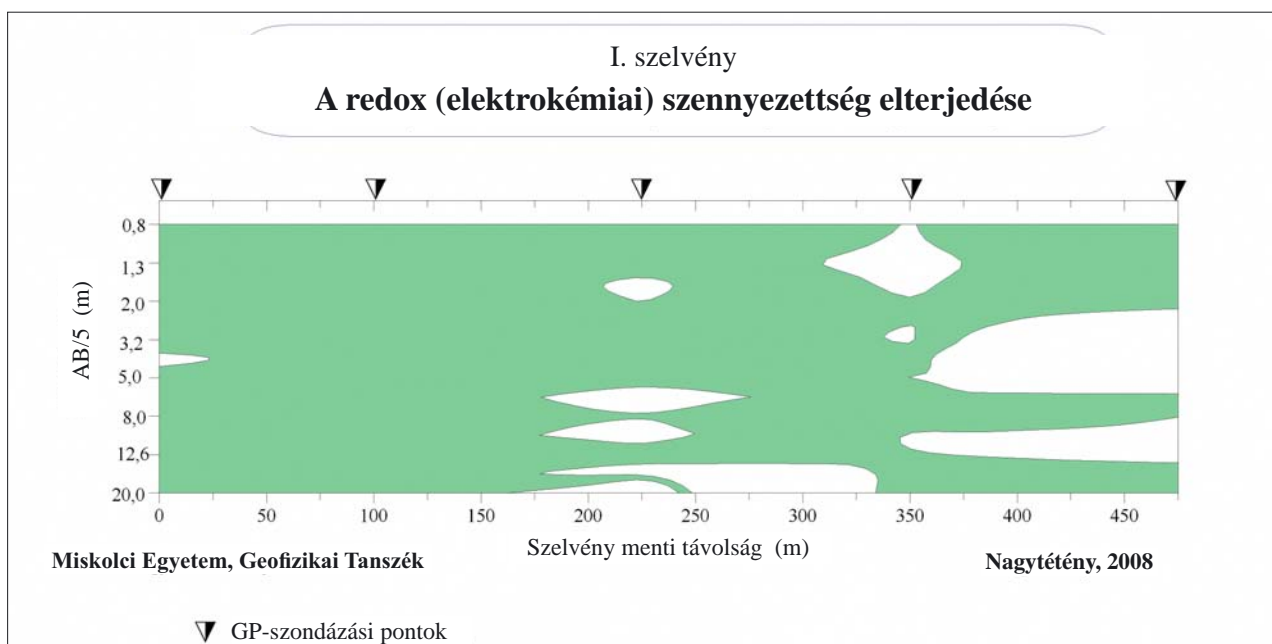
A Miskolc-Bedő-hegy területén lévő szánkópálya alatti földtani felépítést, 2009 tavaszán – hallgatói terepi gyakor-

lat keretében – az IRIS SYSCAL Pro (72 Ch.) multielektrodás műszerrel végzett méréssel vizsgáltuk. A mérési eredmények 2D inverziójával a felszín alatt 40 méteres mélységig megkaptuk a földtani felépítés fajlagos ellenállás-eloszlásának vertikális képét (7. ábra), valamint a 8. ábrán látható polarizálhatóság eloszlásának vertikális metszetét.

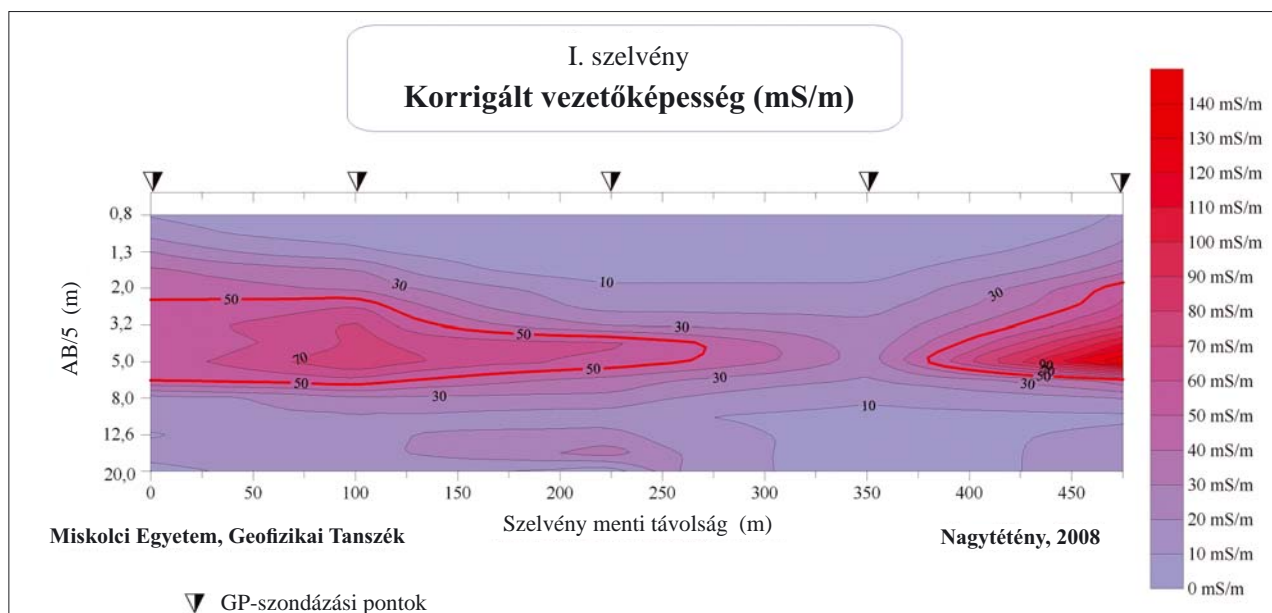


3. ábra | A membránpolarizáció elterjedésének vertikális metszete a nagytétényi kommunális hulladéklerakó esetén ($0,2 \text{ sec} > \tau > 0,8 \text{ sec}$)

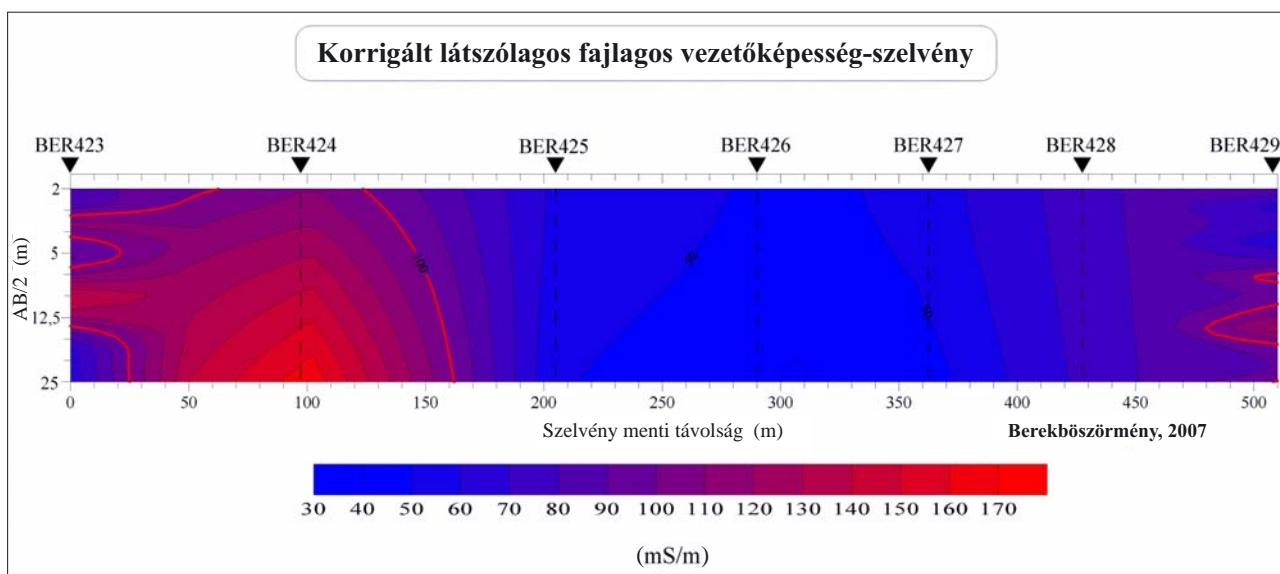
Figure 3 | Vertical section of membrane polarization over the Nagytétény communal waste site (time constants are between 0.2 and 0.8 second)



4. ábra | A redox polarizáció elterjedésének vertikális metszete a nagytétényi kommunális hulladéklerakó esetén ($0,6 \text{ sec} < \tau < 1,2 \text{ sec}$)
Figure 4 | Vertical section of redox polarization over the Nagytétény communal waste site (time constants are between 0.6 and 1.2 second)

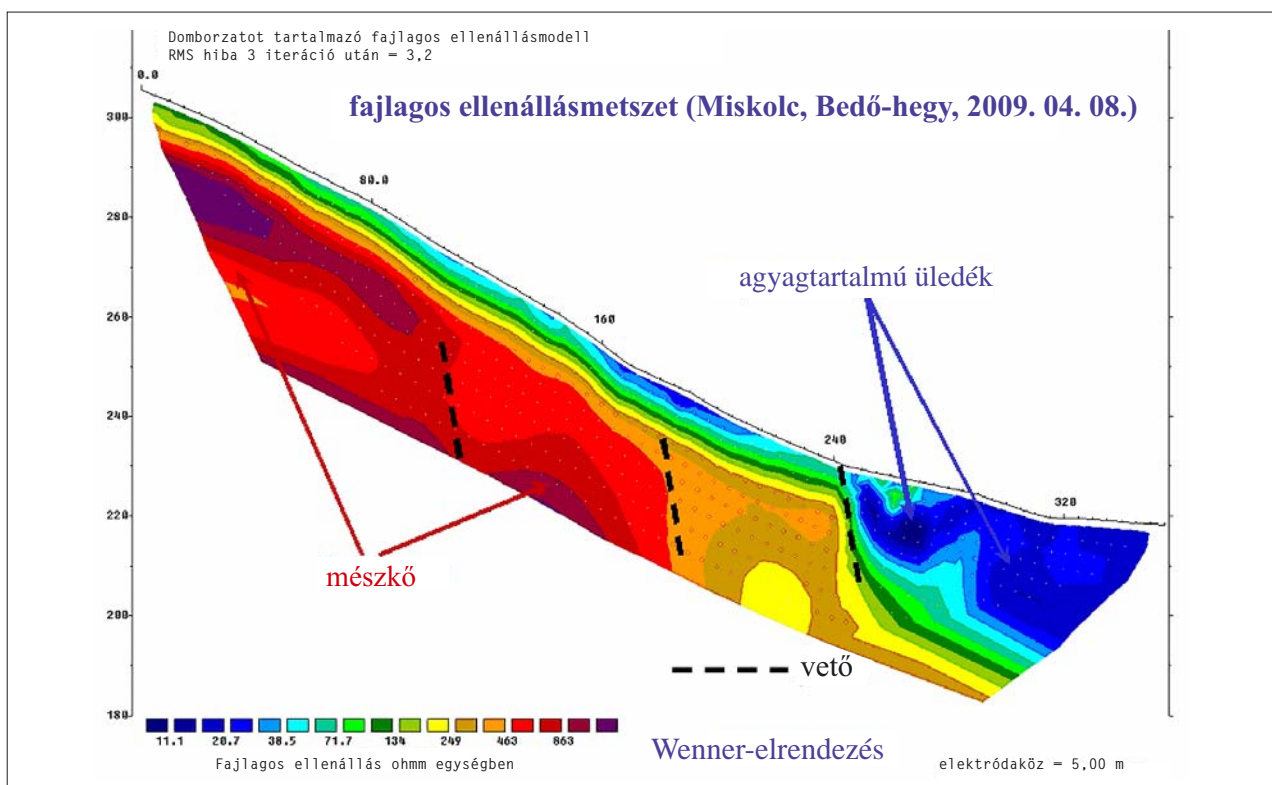


5. ábra | A korrigált fajlagos vezetőképesség vertikális metszete (Nagytétény, 2008)
Figure 5 | Vertical section of corrected conductivity (Nagytétény, 2008)



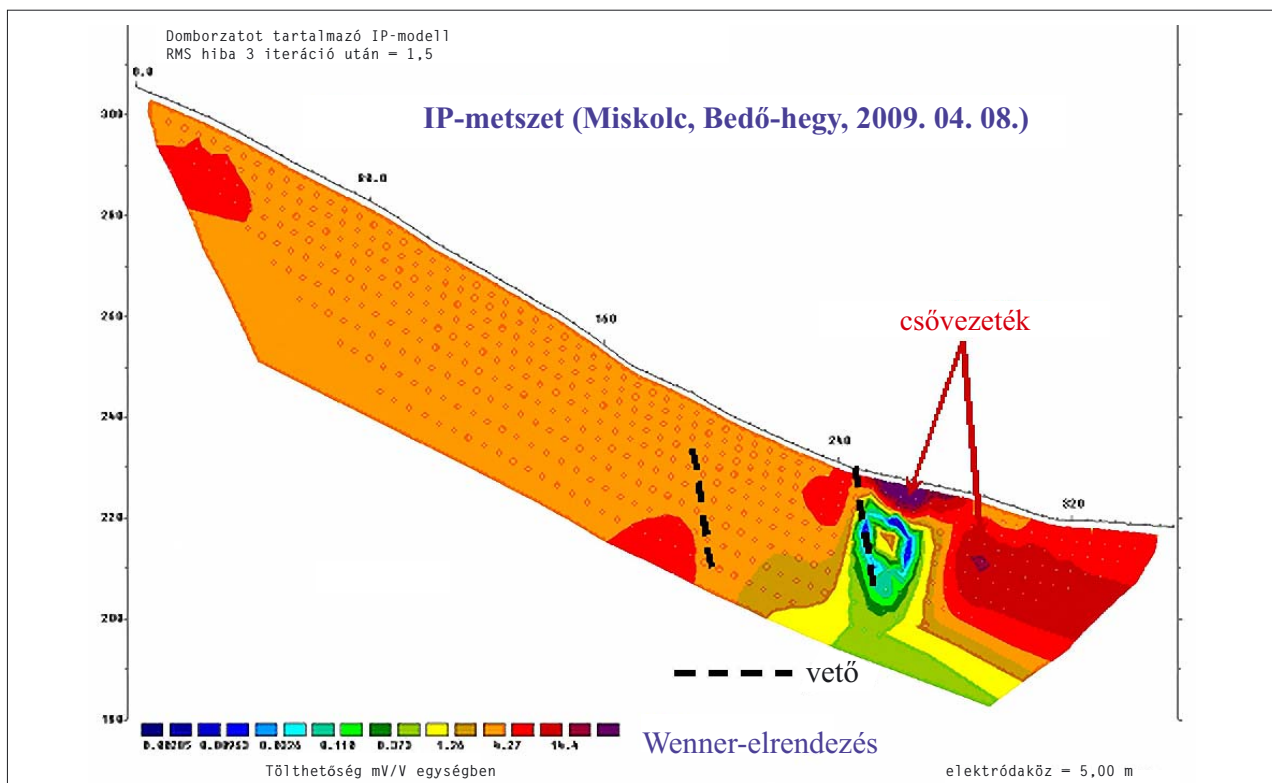
6. ábra | A korrigált fajlagos vezetőképesség vertikális metszete (Berekböszörmény, 2007)

Figure 6 | Vertical section of corrected conductivity (Berekböszörmény, 2007)



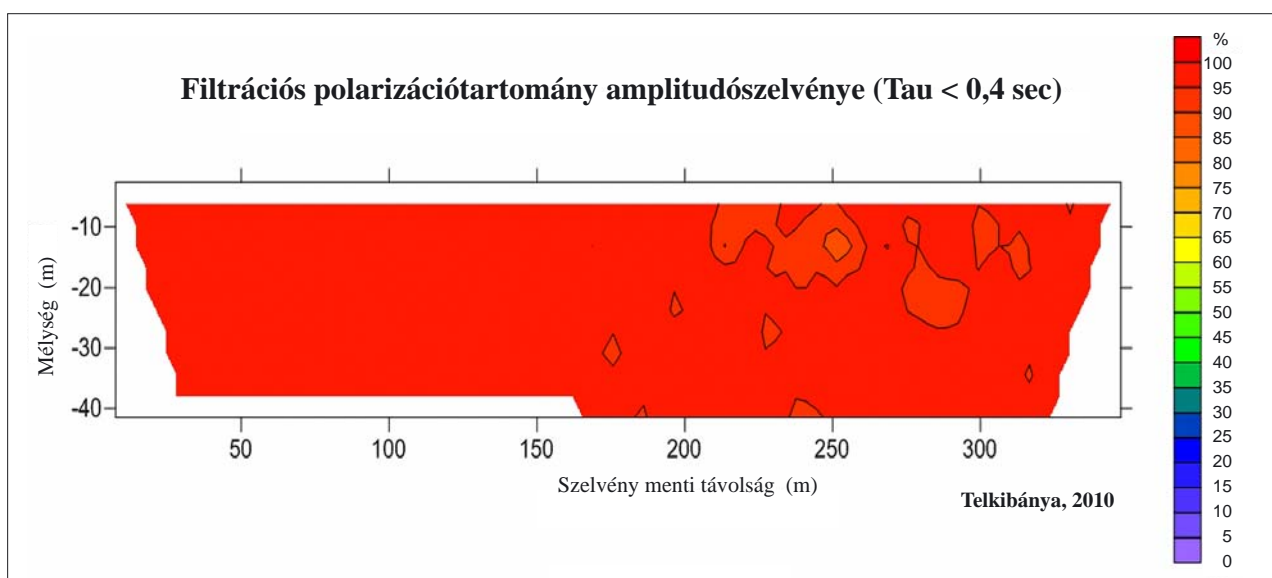
7. ábra | A földtani felépítés fajlagos ellenállásképeének vertikális metszete. (Horizontális skála: 16,41 pixel per távolságegység; a vertikális nagyítás mértéke a modellmetszeten = 1,70; az első elektróda 0,0 méternél, az utolsó elektróda 355,0 méternél helyezkedik el)

Figure 7 | Vertical section of resistivity image of the geological structure. (Horizontal scale is 16.41 pixels per unit spacing; vertical exaggeration in model section display = 1.70; first electrode is located at 0.0 m; last electrode is located at 355.0 m)



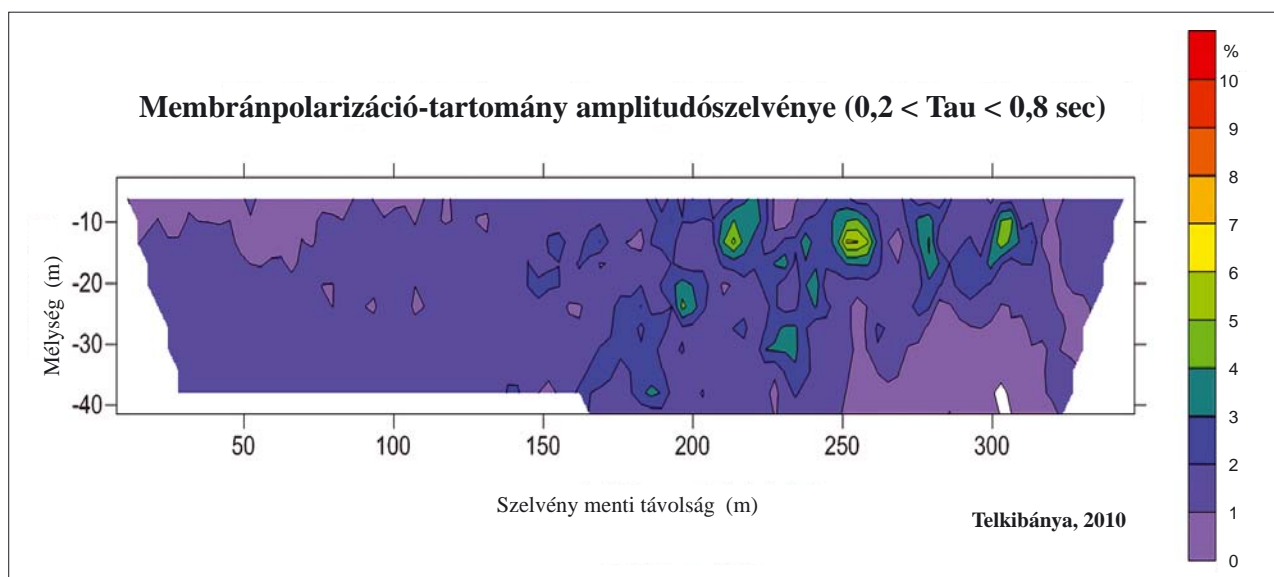
8. ábra A földtani felépítés polarizálhatósági képének vertikális metszete. (Horizontális skála: 16,41 pixel per távolságegység; a vertikális nagyítás mértéke a modellmetszeten = 1,70; az első elektróda 0,0 méternél, az utolsó elektróda 355,0 méternél helyezkedik el)

Figure 8 Vertical section of polarizability image of the geological structure. (Horizontal scale is 16.41 pixels per unit spacing; vertical exaggeration in model section display = 1.70; first electrode is located at 0.0 m; last electrode is located at 355.0 m)



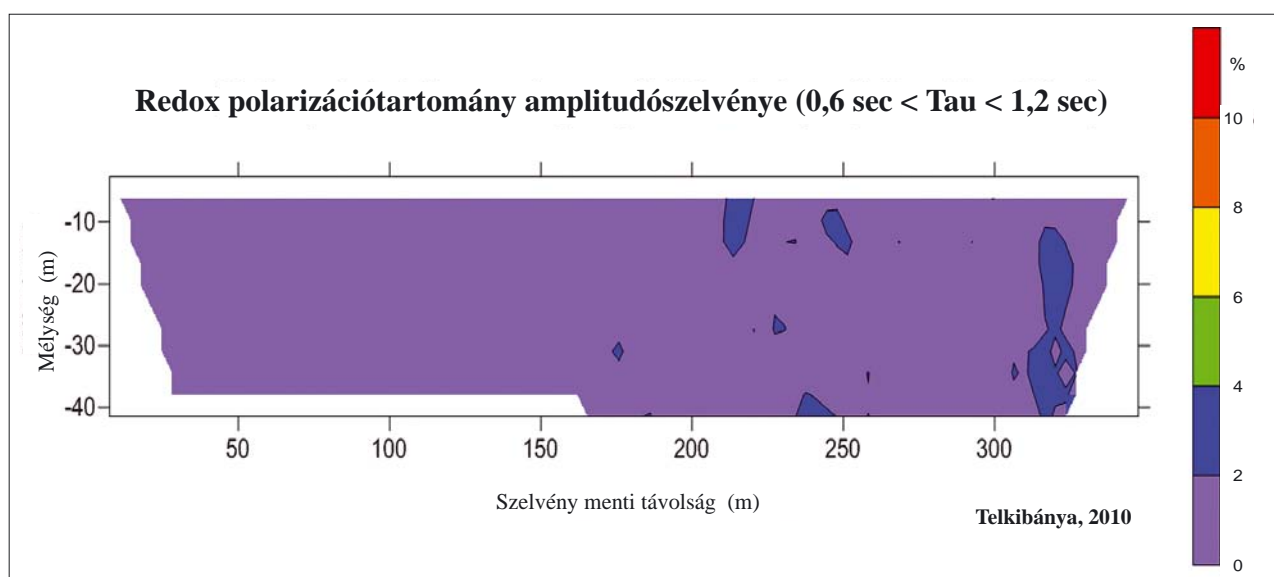
9. ábra A filtrációs polarizáció jelenléte a közegben

Figure 9 Location of filtration polarization in media



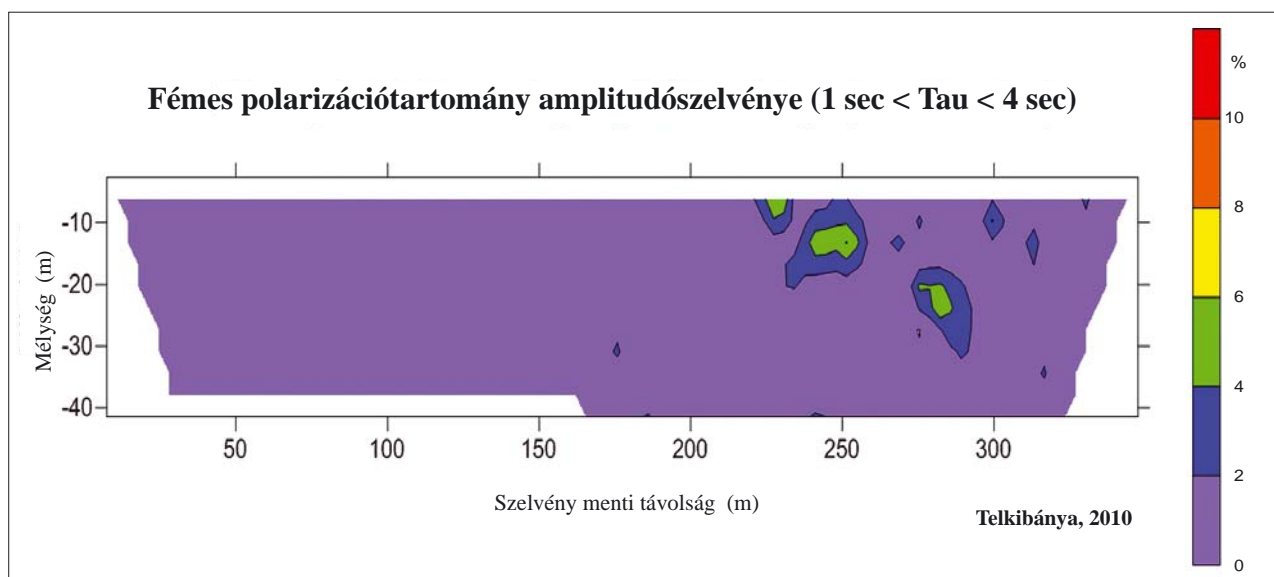
10. ábra | A membránpolarizáció kiterjedése a közegben

Figure 10 | Location of membrane polarization in media



11. ábra | A redox polarizáció kiterjedése a közegben

Figure 11 | Location of redox polarization in media



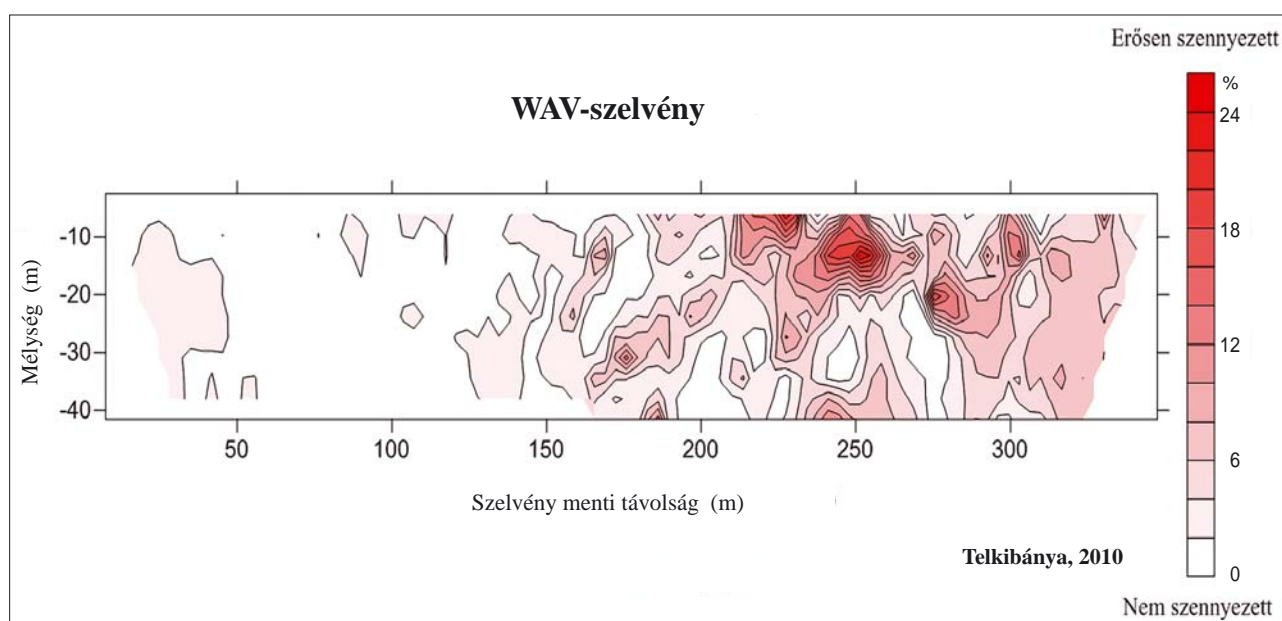
12. ábra | A fémes polarizáció kiterjedése a közegben

Figure 12 | Location of metallic polarization in media

Az eloszlásképek alapján vizsgálható a lejtőtörmelék, valamint az alatta megjelenő két mészkőszint vastagsága és kiterjedése, kijelölhetők a vetők és a szánkópálya alján, a talajban lévő csővezeték helye.

Az időállandó-spektrum számítására kifejlesztett Monte-Carlo inverziós módszerrel többek között a telkibányai (2010) mérés eredményét dolgoztuk fel. A 13. ábrán bemutatott WAV-metszet maximumai a kőzet ércesedési helyeire utalhatnak a metallikus polarizációs hatás miatt. Az itt be-

mutatott mérés 5 méteres elektródaközzel, Wenner-elrendezésben történt. Négy polarizációtípusnak megfelelő komponenszt keresett a program a lecsengések vizsgálatakor. Az alábbi ábrákon az időállandó-tartományonként így kapott amplitúdószelvények (9–12. ábra), valamint a WAV-szelvény (13. ábra) látható. Az utóbbin az „Erősen szennyezett” jelölésű zóna természetesen az ércesedést valószínűsíti, nem pedig valódi szennyező anyagot a talajban, de ezek GP-lecsengésben mutatott hatása a fémes polarizáció miatt



13. ábra | Monte-Carlo inverziós módszerrel számított WAV-metszet (Telkibánya, 2010)

Figure 13 | Vertical WAV section calculated Monte Carlo inversion method (Telkibánya, 2010)

hasonló. Két zónában mutatkozik meg ez a hatás, az egyik kb. 15, a másik pedig kb. 25 méteres mélységben, a terítés mentén 250–275 méteres intervallumban. Ezeknek a zónáknak a környékére eleve jellemző, hogy az algoritmus nagyobb időállandókat és azokhoz nagyobb amplitúdókat talált, mint a szelvény többi részén.

A 9. ábra a filtrációs polarizáció amplitúdóeloszlásának vertikális metszetét mutatja. A lecsengésekben dominánsan jelenlévő, alacsony időállandójú komponens nagy amplitúdóval (közel 100%-os) jelentkezik, kivétel a szelvény „jobb felső” negyedében, ahol 90% körüli értékre csökken. Ennek magyarázata a talaj nagy nedvességtartalma, mivel a mérés erős esőzés után, egy patak völgyben, a völgy tengelyével párhuzamos szelvény mentén történt. Az időállandóval való súlyozás használhatóságát mutatja, hogy a WAV-paraméter (13. ábra) még ennek a domináns alacsony időállandójú komponensnek a hatását is elnyomja, és a környezetszennyezési, ércutatási szempontból érdekesebb hatásokat emeli ki.

A 10. ábrán látható membránpolarizáció a szelvényben mindenhol megfigyelhető, de amplitúdója alacsony, 10% alatti értéket vesz csak fel. Ez a hatás a talajban lévő diszperz agyagtartalomra utal.

A lecsengésekben a redox komponens alig van jelen, mindössze 0–4% közti amplitúdóval jelentkezik (11. ábra), ami arra utal, hogy a területen kémiai szennyezettség nem fordul elő.

A fémek polarizációhoz köthető, nagyobb időállandójú komponensek amplitúdóeloszlása (12. ábra) ugyan mindenhol 10% alatti értékeket mutat, azonban a kialakuló anomáliák már érzékelhetően mutatják az ércdúsulások helyeit a talajban.

Összefoglalás

A sorfejtéses inverziós módszerekkel a gyakorlatban aránylag egyszerűen és eredményesen meghatározhatók az időtartománybeli gerjesztett polarizációs mérések időállandóspektrumai, melyek segítségével a közeg fémek, redox, diszperz agyagos, valamint – az elektromosan vezető fluidumtartalomhoz kötött – filtrációs szennyezettségének a mértékét határozhatjuk meg. Az inverziós feldolgozás számos, szennyezett területen mért adat értelmezésének az alapját jelentette.

A meghatározott időállandóspektrum-értékeknek az időállandóval való súlyozása (WAV) kiemeli a veszélyesebb (nagyobb időállandóval jelentkező) redox és fémek hatásait, valamint elnyomja a természetben gyakran megjelenő (kevésbé veszélyes) membrán- és filtrációs anomáliákat, ezért a szennyezettség minősítésére a WAV-értékek előnyösen alkalmazhatók.

A cikkben bemutatott Monte-Carlo inverziós eljárással működő szoftver az IRIS SYSCAL Pro (72Ch.) műszerrel végzett sokelektrodás mérések TAU-transzformációs feldolgozását teszi lehetővé.

Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti a Magyar Tudományos Akadémiát az MTA–ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport támogatásáért. A szerzők ezúton is megköszönik a T046765. számú OTKA projektben kapott kutatási támogatást, valamint a nagytétényi és a berekböszörményi méréseknél a Háromkő Bt. együttműködését.

Hivatkozások

- Keller G. W., Frischknecht F. C., 1966: Electrical Methods in Geophysical Prospecting. Pergamon Press, Oxford
- Sumner J. S., 1976: Principles of Included Polarization for Geophysical Exploration. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam
- Turai E., 1981: GP time-domain görbék TAU-transzformációja. Magyar Geofizika, XXII/1, 29–36
- Turai E., 1985: TAU-Transformation of Time-Domain IP Curves. Annales Univ. Scien. Budapestensis de Rolando Eötvös Nom., Sectio Geophysica et Meteorologica, I–II, 182–189
- Turai E., Dobróka M., 2001: On a Generalized TAU-Transform Method – Some Case Histories. Publications of the University of Miskolc, Series A, Mining, Geosciences, 59, 75–94
- Turai E., 2004: IP Data processing results from using TAU-transformation to determine time-constant spectra. Geophysical Transactions, 44/3–4, 301–312
- Turai E., Dobróka M., Vass P., 2008: TAU-transformation of Time-Domain IP data measured over a slag ash site. IV. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia, Debrecen, 2008. március 28–29., Konferenciakiadvány, REXPO Kft., ISBN 978-963-06-4625-3, pp. 269–274
- Wait J. R., 1959: Overvoltage Research and Geophysical Applications. Pergamon Press, London

Hozzászólás Polcz Iván „Egy sekélyrefrakciós szelvény utóélete” című cikkéhez

SZALAY ISTVÁN

Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, 1145 Budapest, Kolumbus utca 17–23.

**Szalay, I.: Comment on „Follow-up of a seismic shallow refraction section”
by Iván Polcz**

Beérkezett: 2010. január 10.; elfogadva: 2010. január 10.

Polcz Iván a *Magyar Geofizika* 50. évf. (2009) 3. számában „Egy sekélyrefrakciós szelvény utóélete” címmel folytatta a sekélyrefrakciós kiértékelési eljárások összehasonlító ismertetésével foglalkozó cikksorozatát. A cikk egy többszerkezet kutatásával kapcsolatos szakirodalmi polémiát elevenít fel. A cikkben szereplő neves szerzők ugyanarra a mérésre túlzottan eltérő megoldásokat adnak, ami rossz fényt vet a refrakciós módszerre és kiértékelési eljárásainak megbízhatóságára is. Ezért a kérdés magyarázatot igényel.

A magyarázat a változatos, lefelé növekvő sebességeket mutató többreteges menetidőgörbe-rendszer eltérő részleteességű, felfogású, sokszor hibás kezelésében, valamint a közelítő kiértékelési eljárások lehetőségeihez igazodó, két-reteges modellre való leegyszerűsítésben rejlik.

A cikkből állatorvosi lóhoz hasonló problémahalmaz tárul elénk, jó lenne okulni belőle, vagyis a matematikailag szabatos vagy közelítő szerkesztési eljárások során a szizmika szabályainak és a földtani valószínűségnek is megfelelő kiértékelési eljárást kellene alkalmazni. A cikkben tárgyalt egyik eljárás sem ilyen, mert valamennyien kihagyják a többfelfelület is kirajzoló összefüggő felső refraktort. Sjögren például a víz sebességének az alsó szintig terjedését feltételezi; Whiteley VIRT-eljárással készült megoldása pedig ahelyett, hogy a laza réteg vastagságának és sebességének változásaival foglalkozna, a közbülső sebességeket bontja részekre, ami réteges földtani modellel egy fejtű állított rétegsort képviselhetne, ha az alsó szint sebessége is így változna konstans helyett.

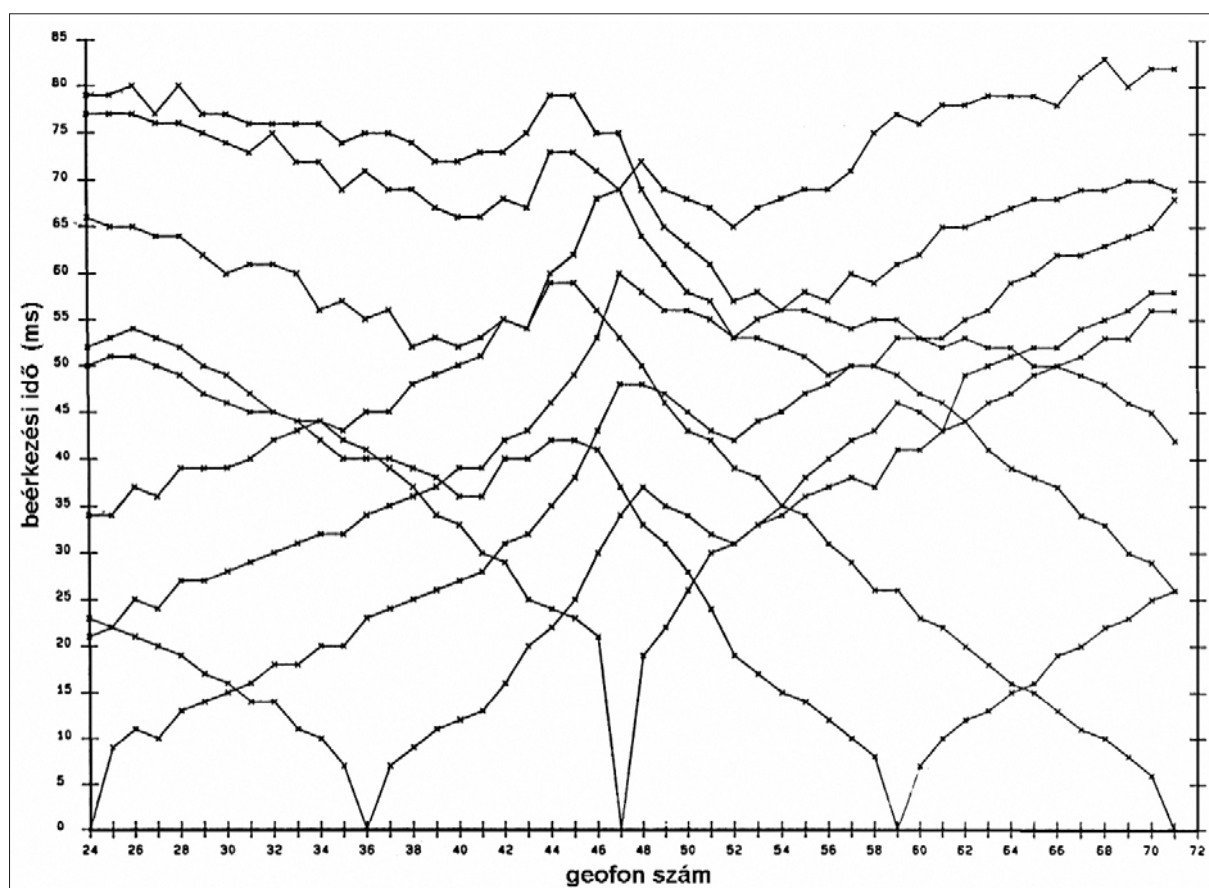
Palmert követve valamennyien a két közelebbi külső robantópont beérkezéseire támaszkodtak (Polcz 2. ábrája) – de különböző módon –, ezért eredményeik egymáshoz képest nagyon eltérnek mind mélységben, mind alakban, mind pedig sebességeloszlásban. Megjegyzem még, hogy nem

illik Hagedoornra hivatkozni a többértelműségnél, mert ő finomságokra, pl. átlótt rétegre stb. gondolt, nem pedig az anyag szubjektív kezelésére, amelynek szerepet játszhat tévedésen kívül pl. az eszközrendszer korlátozottsága is. Ilyen korlátozottság pl. az, hogy a gépi bejelölés után számítógéppel egyszerű kiértékelő programokat (pl. PROMAX-korrekciónál DRM, GRM, DT) lehet futtatni, de egyesített menetidőgörbét nem lehet szerkeszteni, és szabatosabb kiértékelést (sugárutas vagy időmezős szerkesztést) nem lehet az adatokon végrehajtani.

Palmer nyers beérkezési idősorokat használ nem törődve azzal, hogy a jobb oldalon az 58. pontnál rétegváltás van a felső és az alsó szint között, és legalább kétszer akkora átlagsebességgel kellene szerkesztenie, mint amennyit használ (a felső szinti beérkezést nem beleértve, illetve a törésponttól a nagyobb számok felé a fedőágból megtoldva). Sjögren ez utóbbit így csinálta, de valószínűleg azért, hogy a Hales-féle hurok kijöjjön, ő a felső szinthez tartozó menetidőgörbék 24. és 71. pontok közötti ágaira egyesített, feltételezve, hogy a tényleg emelkedő mély szint feljön az aljzat felszínig. Ez a fedőág-rendszerből nem bizonyítható, mindkét szerző keveri a szinteket, ezért szórnak a határsebességek is.

A szerző szerkesztés értelmezésére vonatkozó tanulmányozási javaslatának megvalósítását ezen a már referenciákkal rendelkező érdekes modellen kellene elvégezni. Ezekhez néhány gondlattal és megoldási javaslattal szeretnék hozzájárulni.

A víznyelőt a topográfián is látható horpadásnál a menetidőgörbe-rendszeren kivastagodó laza réteg és összes refrakciós ág tükrözi (Polcz 2. ábrája). A kis bemerüléstől eltekintve lényegében két folytonos refraktáló határfelület létezik. A felső refraktáló szint a szálban álló, még kissé bontott



1. ábra | Polcz Iván cikkének a fentiekben hivatkozott ábrája (*Magyar Geofizika* 50/2, 116)

Figure 1 | The figure referenced above from the article by I. Polcz (*Magyar Geofizika* 50/2, 116)

közetfelszín, korrekciós szemlélettel a tágabb értelemben vett laza réteget képviseli, megszerkesztéséhez tökéletes a 24. és 71. pontból lőtt találkozó menetidőgörbe-pár. A robbantóponti (láb-) sebességek időjárásától függően száraz, kapilláris nedves, vizes, mállott kőzetösszetevőit laza fedőréteggént célszerű összevonni és a legvastagabb, töbör környéki átlagsebességgel szerkeszteni. E szerkesztésre minden eljárás alkalmas.

Az alsó refraktáló felületről eredő nagy látszólagos sebességű beérkezéseket a közelebbi külső robbantóponti ágak csak részben, a távolabbiak teljesebben képviselik, ezért a mély szintet ezekből, az 1. és 95. robbantóponti ágakból lehet megszerkeszteni kölcsönös idők kreálása és az átlag vagy az intervallumsebességek megállapítása után.

A szerző bizonyította Hales grafikus eljárásának előnyeit, ezért egyetértek alkalmazásának szorgalmazásával.

Líbiában is jártunk

DRASKOVITS PÁL, NEMESI LÁSZLÓ

Ha valaki olvassa ezt a történetet, könnyen gondolhatja, régen volt, tán igaz se volt... Csak emlékeztetőül: 2007-ben szabadultak ki sokéves börtön és háromszori halálra ítélet után a bolgár ápolónők. Ők is valahogy úgy kerültek Líbiába, mint a geofizikusok. Szerencsére a mi hazajövetelünk simább volt.

Lehet, hogy ma már túljutottunk a magyar geofizika fénykorán? Az 1980-as években a szakma sok területén az élvonalban voltunk. Itthon és külföldön számos olyan problémát meg tudtunk oldani, amellyel a geofizika abban az időben szembesült. Műszereink, feldolgozóprogramjaink színvonalához és szakembereink széles körű gyakorlati tapasztalatahoz hasonlóval a világ kevés helyén rendelkeztek. Mind ezt a hazai képzés és a rendszeres, átfogó hazai, állami kutatás alapozta meg. A módszer- és műszerfejlesztést a ténylegesen felmerülő gyakorlati problémák megoldásának igénye vezérelte. A földtani kutatásban éveken át dolgozó felső- és középfokú végzettségű szakemberek ennek köszönhetően nemcsak Európában, de Ázsiában, a Közel-Keleten és a karibi országban is megállták a helyüket, és képesek voltak alkalmazkodni a megszokottól nagyon eltérő éghajlati, szakmai és emberi körülményekhez is.

A sok külföldi munka egyike a kis volumenű vízkutatás volt Líbiában, a Szahara É-i szélén, 1980-ban. Hogyan is zajlott le ez a geofizika szempontjából sikeres, de a korszak ellentmondásaival terhelt vállalkozás?

A magyar állam a hetvenes évek vége felé már kezdett jelentősen eladósodni, ezért „pártunk és kormányunk” arra kezdte biztatni az akkor még állami cégeket, hogy szerezzenek külföldi – elsősorban keménydevizás bevételű – üzleteket, munkákat (ma már csak emlék, hogy a forint nem volt konvertibilis, és egészen hihetetlen devizaárfolyamok léteztek). Az OVIBER (Országos Vízügyi Beruházó Vállalat) vezérkara megfogadta a tanácsot, és rátalált a líbiai pályázatokra. A Kadhafi vezette líbiai kormány az idő tájt döntött úgy, hogy a Szahara északi szélén öntözéses mezőgazdasági területeket alakít ki. 30–50 km²-nyi részekben elsimítják a homokbuckákat, ezen belül 1 km²-es területeket aszfaltúttal vesznek körül, az út mentén fákat ültetnek. Telkeket jelölnek ki, ezeken házakat építenek, és kutakat fúrnak, amelyek vízhozama az öntözéses mezőgazdasági művelést is lehetővé teszi. A házakat teljesen bebútorozzák, korszerű mezőgazdasági gépekkel látják el, majd egy-egy birtokot az ott élő beduinoknak adnak, akik (talán 5 évig) még fizetést is kapnak, míg meg nem tanulják a földművelést és önállóak nem lesznek.

Nos, az OVIBER fővállalkozóként egy ilyen terület (Wadi Abu Sheyba) 30 kútjának fúrására nyerte el a megbízást. A kutak szükséges mélységét geoelektromos mérések-

kel kellett meghatározni. A fővállalkozó a geofizikai mérések elvégzésére az ELGI-vel szerződött. Persze abban az időben sem az OVIBER-nek, sem az ELGI-nek nem volt joga szerződést kötnie külföldi munkára, ezért kellett egy külkereskedelmi vállalat is, amely már a líbiai mezőgazdasági minisztérium partnere lehetett. Ez volt a NIKEX Külkereskedelmi Vállalat. Az elképzelés szerint ők intézték az utazási és vámügyeket, tőlük kaptuk a külföldi napidíjat, ők biztosították a működési költséget, azaz mindent, ami nem geofizika.

A geofizikus brigád(ok) története

A felkészüléshez annyit tudtunk a földtani felépítésről, hogy a szomszédos területeken 300–400 m mélységű kutakat fúrtak, mintegy 80–100 m vastagságú fiatal durva törmelékes összlet alatti triász mészkő repedezett zónába. Ehhez a földtani modellhez és ehhez a kutatási mélységhez tapasztalataink alapján a gradiens elrendezésű vertikális ellenállás-szondázást választottuk, mégpedig 4000 m-es, legnagyobb tápelektroda-távolságig. Az ilyen mérésekhez voltak saját fejlesztésű és építésű műszereink: a DIAPIR és a Ge-25. Magunkkal vittük a 4000 m-es terítéshez szükséges kábeleket, a megfelelő teljesítményű generátort, az elektródákat és egyéb tartozékokat; mindezt egy GAZ-66 és egy UAZ-452 típusú gépkocsiba csomagoltuk (ezek a szovjet gyártmányú terepjárók jól ismertek voltak Líbiában). Összesen hatan (*Bató Vendel* gépkocsivezető, *Lukács József* technikus, *Nemesi László* geofizikus és *Pálfalvi Károly*, *Pápai Géza*, *Tiszavölgyi Ferenc* technikusok) készülődtünk a nagy útra.

Az utazás

Február végén indultunk el gépkocsijainkkal Triesztbe, ahol a Stafeta Liguri nevű kilencszintes, 210 m hosszú, 34 m széles komphajót kellett megtalálnunk, amelynek fedélzete a vízszinttől 30 m magasságban volt. A három lakószint még ebből emelkedett ki. Kerestük ezt a „kis hajót”, de nem találtuk. Szálláshelyünkről, a városból óránként kiszaladtunk a kikötőbe, hogy megjött-e már. Talán harmadnapra volt szerencsénk meglátni. Már csak alig fél nap kellett ahhoz, hogy az a rettenetes mennyiségű kamion, meg a mi kis kocsijaink is elfoglalják a helyüket, rendesen leláncolják azokat, és elinduljunk. Az útleveleinket a hajóskapitány páncélszekrényébe zárták. Kétszemélyes kis kabinjaink voltak, és reggel-délben-este a pincér (Tónió) kiáltásaira mehettünk az étterembe enni, ami benne volt az utazási jegy árában. Nem volt válogatás, azt ettük, amit Tónió elénk tett.



Az ELGI szimbóluma, a piros-fehér UAZ a sivatagban

Mindig volt egy-két pohár vörösbor is, és mindent meg is tudtunk enni mi, terepi emberek.

Ment is a hajónk egy jó napig, majd kikötött Bariban. Itt fél napig tartott a kamionok kirakodása, az újak bepakolása, de ezek befejezése után sem indultunk el. Kiderült: a Földközi-tengeren nagy vihar van. Álltunk pár napig Bariban. Egyik nap kaptunk a hajóskapitánytól egy kézzel írt sajtóclit, amelyben igazolja, hogy mi az ő utasai vagyunk, és kimehetünk várost nézni. Érdekes volt ez a városka a két méter széles utcáival, az ablakok közt kifeszített ruhaszárító köteleivel, az ott élők rendkívül hangos utcai társalgásával, de nem mertünk sok időt eltölteni, nehogy nélkülünk menjen tovább a hajónk. Végül vagy három nap múltán elindultunk. A vihar azonban nem múlt el, sőt most már az Adriára is áterjedt. A 210 méteres hajó tíz métereket billegett előre-hátra, egészen az olasz csizma sarkáig. Ott azonban Szicília felé fordulva hajónk az előre-hátra mozgásokat már az oldalra mozgásokkal is kombinálta. A 30 méter magas fedélzetre felcsaptak a fröcskölő hullámok. Be kellett mennünk kabinjainkba, ahol a székek ide-oda csúszkáltak. Csak kapaszkodva tudtunk ülni is. Az ágyra lefeküdni sem lehetett, mert leestünk volna. Nyolc órán át tartott a vihar. Hatunk közül csak Pápai Géza nem lett tengeri beteg. A vihar elmúltával eszünkbe jutott, hogy se a kolbászsukat, se a pálinkánkat nem vihetjük be a szigorúan muzulmán Líbiába, hát fogyasztottunk belőle rendesen, és igen jókat aludtunk. A reggeli ébredésnél csak a tükörsima tenger és egy hófedte hegy látszott: az Etna. Cataniában egy napig tartott a kamionok ki- és berakodása, majd este elindultunk Málta – Tripoli felé. A hajó kormányosfülkéjében egész éjszaka egy lélek sem volt, robotok irányították a hajót, olyan 40 km/óra sebesség mellett. A plotter egy 100000-es térképre rajzolta az útvonalunkat. Reggelre Tripoli partjainál voltunk, de még egy jó napig nem fértünk be a kikötőbe.

Hajónk kikötése után Afrika földjére léphettünk, s mert útlevelünket rendben levőnek találták, kimehettünk a városba. A már ott levő OVIBER-es kollégák elvihettek szálláshelyünkre, de a helyi hatóságok műszerkocsijaink, műszereink okmányainak elintézésével nem kapkodtak. Ezek ügyében majd menjünk a közeli napokban, szólta a hivatalos eligazítás (egyes nyelvekben a „holnap” szó nem a mai után következő napot jelenti, hanem a jövő egy bizonytalan idő-



A kutatási terület, azért nem teljesen kopár

pontját, amely ember által pontosabban meg nem határozható). Mentünk mi másnap, harmadnap is, de semmilyen okmányunk nem felelt meg nekik, de azért fizessünk vámot is, ha ezeket be akarjuk vinni. A vámköltség persze több lett volna, mint az egész geofizikai mérésért leszerződött összeg. Ennyi pénze senkinek sem volt. Mentünk a magyar kereskedelmi kirendeltségre, a követségre, telefonálgattunk a NIKEX-be az ELGI-be, a Központi Földtani Hivatalba, de csak nem haladt az ügy. Teltek a napok, a hetek, sőt a hónapok is, mire a felszerelésünkhöz jutottunk. (Hihetetlen, de a NIKEX-ben senki sem tudta, mi is a rend Líbiában). A mi érkezésünk után pár nappal jött karotázs-szakértőnk, *Salamon Batur* is, akit nehezen engedtek ki a vámosok. Ugyanis – tán a Petőfi rádió hullámhosszán – megszólalt zsebrádiója, amelyen a parti őrség beszélte meg teendőit (sok arab országban az FM sávot csak a hatóságok használhatták, és sokáig tilos volt az ezen a sávon is működő rádiók bevitel). Ezt hallották a határőrök, és kollégánkat rögtön diverzánsnak, izraeli kémnek vélték, rádióját azonnal elkobozták. Kellett pár nap, míg tisztázta magát.

Az előkészületekről is valamit

Majdnem három hónap telt el, mire kutatási tervünket elkészítettük, azt megvédtük és mire a felszerelésünket a vám-ból kihozhattuk. Addig az OVIBER más ottani munkáiban segítettünk, többnyire Tripoliban, de a tuniszi határ mellett is. Ettől függetlenül minden vasárnap (Líbiában a hét második munkanapja!) ki kellett mennünk a mi munkaterületünkre is, és ott be kellett számolni az útépitőknek, a házépítőknek, a fát ültetőknek, a homokbuckákat egyengetőknek, a francia műszaki ellenőröknek és a geofizikai csoportnak is az elmúlt héten, a projekt területén vagy azzal kapcsolatban végzett munkáiról Kalifa úrnak, a projektvezetőnek.

Időközben a munka francia műszaki ellenőreivel váratlanul történt valami. Kadhafi ugyanis úgy döntött, hogy kirúgja hazájából a fránya franciákat, meg az amerikaiakat is. Egy hét közepén kivezényelték a katonaruhába öltöztetett gimnazistákat az amerikai meg a francia követség elé, majd a líbiai katonák bementek az épületekbe, minden szoba földjére kiöntöttek egy üveg benzint, és az ott dolgozókat távozásra szólították fel, aztán felgyújtották az épületeket.

A tűzoltók ügyeltek arra, hogy a láng más épületekre ne terjedjen át, és a diákok hatalmas üdvrivalgása mellett égtek a követések. A hétfői gyűlésen Wadi Abu Sheybában Kalifa úr szelíden mondta francia műszaki ellenőreinknek, hogy „maguk ki vannak rúgva”. Aztán a következő hét közepén minden ott dolgozót berendeltek Tripoliba a Vízügyi Minisztériumba. Megkérdezték tőlünk: „Mondta valaki maguknak, hogy a franciák ki vannak rúgva? Mi nem mondtuk. Legyenek szívesek az elmúlt vasárnapi ülést megismételni. Értették, uraim?” Majd a minisztériumi ember mindenki kezét fogott, és elmehettünk.

A francia műszaki ellenőrök ezt követően ismét minden vasárnap ott voltak az értekezleten.

Maga a munka, amelyhez kellett azonban egy másik ELGI-s brigád is

Az egy-másfél hónapra tervezett munka így a harmadik hónap vége felé most már rendben megindulhatott volna, csak hát a vízumunk mindössze három hónapra szólt. Ezt ugyan ott is meghosszabbíthatnánk volna, de a három, magyar orvosokkal, ápolónőkkel üzemelő kórház révén pontosan tudtuk, hogy ez a hosszabbítás majdnem letelepedési engedélyt jelent. Ennek birtokában viszont eljönni alig lehet. Az ország elhagyásához mintegy harminc pecsét kellett különböző hivataloktól, amelyek igazolták, hogy az illetőnek nincs tartozása az áramszolgáltatótól az adóhatóságokon át a vízművekig senkinek. Egy pecsét harminc napig volt érvényes. A hivatalok személyzete meg általában lusta volt utánanézni az illető ügyeinek. Elküldte, mondván, jöjjön holnap, majd jöjjön másnap reggel, de akkor meg most nincs itt az ügyintéző, jöjjön este, stb. Mire valakinek már volt húsz pecsétje, lejártak az első. Ezért a magyar egészségügyi dolgozóknak sokszor fél évükbe telt, mire tényleg hazajöhettek szabadságra. Felhívtuk hát az ELGI vezetőit, hogy váltsanak le bennünket a harmadik hónap lejárta előtt. Nehezen értették meg, de végül elhitték, hogy így lesz jobb és olcsóbb mindenkinek. Jött hát a váltó csapat is, több részletben (*Czobor István* technikus, *Draskovits Pál*, *Simon Pál* villamosmérnök, *Stomfai Róbert* geofizikában jártas tanár, *Zalai Péter* geofizikus, *Sági Tibor* technikus). Szegények az itthoni



Végre mérünk

pesti harminc fokból a szaharai ötven fokba csöppentek, és alig kaptak levegőt.

Amikor május legvégén a felszerelés végre kiszabadult, az első csoportból már csak ketten voltak Libiában: Nemesi László és Pápai Géza, a másodikból pedig még csak Draskovits Pál. Azonnal indultunk a terepre. Ez kb. másfél-kétórás autótúr volt Tripoliból. Hárman lemértük az első 4000 m-es VESZ-görbét, szinte emberfeletti erőfeszítéssel (azok számára, akik nem ismerik a vertikális elektromos szondázás menetét, csak annyit, hogy az egymást követő tápelektroda-távolságok logaritmikus léptékben követik egymást. Az elején a továbblépés csak néhány métert jelent, de az utolsó lépés már 400–400 méter, mindkét oldalon). Amikor ugyanis már a néhány száz méteres tápelektroda-távolságoknál jártunk, akkor egy egyszerű továbblépés a soron következő elektródahelyig az alábbiakat jelentette:

- kalapáccsal kilazítani a homokból a tövig levert nyolc-tíz, egyenként legalább 5–6 kg-os acélelektrodát,
- a kábeldobbal tovább ballagni a kábelre fölragasztott következő jelzésig,
- visszagyalogolni az előző pontig,
- fölrakni a kocsí platójára az elektródákat, kalapácsot és minden más szükséges dolgot,
- a kocsival elmenni a következő felállásnál lerakott kábeldobhoz,
- leverní és bekötni a 8–10 db. egyméteres elektródát.

Amikor két szomszédos elektródahely között már több mint 200 m volt a távolság, akkor a továbbmenet már kocsival történt; egész jól sikerült megbecsülni, hol kell majd megállni. Szerencsére az esetek többségében a 4000 m-es mérési vonalak gépkocsival járhatók voltak.

Az itthon megszokott létszám felével, nagy kínlódással lemértük az első szondázási görbét $AB = 4000$ m-ig, néhány órát pihegtünk, és igyekeztünk magunkhoz térni, majd összehajigoltunk, aztán amint lehetett, irány Tripoli, egy gyors fürdés, és Nemesi és Pápai kollégákkal rohantunk a repülőtérre, merthogy az esti géppel indultak haza. Draskovits Pál meg ott maradt Tripoliban egyedül, amíg nagyjából egy hét alatt, több nekifutásra megjöttek a második csoport tagjai is.

Az eddigieket főként Nemesi László idézte fel, most Draskovits Pál veszi át a szót.

Ilyen előzmények után, június közepétől július végéig, a „kellemes” libiai nyárban a második brigád be is fejezte a geofizikai méréseket. Eredményeinket a fúrások igazolták. Mint évekkel később itthon, OVIBER-es ismerőseinktől megtudtuk, a kútkiképzés is sikerült, a mezőgazdasági munkához víz már volt. Milyen érdekes lenne ma, harminc év múltán látni, milyen oázis jött létre Wadi Abu Sheyba körzetében.

Ez a munka – mint az expedíciós munkák általában – hozott néhány olyan szakmai meglepetést, amelyekkel itthon nemigen találkozhattunk volna:

Az egyik szakmai meglepetés az volt, hogy a legfőbb egy méter hosszú acélelektrodákkal és a könnyű, hordozható generátorral a csontszáraz sivatagi homokban, 40–50 fős nyári hőségben nagyobb gond nélkül le tudtuk mérni

a 4000 m-es szondázási görbéket. Műszereink – az éppen akkor kifejlesztett, sőt még nem is teljesen kiforrott DIAPIR, de még az őszereg, vagy tizenöt éves GE-25 is – kiválóra vizsgáztak a szélsőséges időjárási körülmények között.

A másik, valóban mellbevágó szakmai tapasztalat az anizotrópia volt, amivel jól meg is jártam (az anizotrópia a geoelektromos mérésből kapott réteghatár és a tényleges réteghatár mélységének hányadosa). A mérések befejezése után 2-3 héttel még Tripoliban elkészített és benyújtott előzetes jelentésbe beleírtam, hogy ismeretlen területen néhány száz méteres mélységek esetén a rutinos geofizikus másféle anizotrópiaértéket használ, ezzel nem tévedhet sokat. Nos, ez normál esetben így is van, de itt nem normál esetről volt szó. Sehogy sem értettük, miért és hogyan kapunk mi két-háromszor nagyobb mélységeket, mint a szomszéd területen korábban dolgozott franciák. (Velük egyébként igen jóba lettünk: pár hét után a jó viszony már odáig terjedt, hogy elővették a sokéves régi méréseiket, összehasonlítottuk a mi görbéinkkel, és mindkét oldalon nagy volt az öröm, hogy milyen jó a megfelelés. Eszembe jutott egyébként, hogy az ELGI elő tudná-e venni a nyolc-tíz éves méréseinek elsődleges terepi dokumentumait...)

A (látszólagos) ellentmondás feloldása akkor született meg, amikor Salamon Batur kollégánk végre életet tudott lehelni a líbiaiak által évekkal korábban megvásárolt és azóta is gyári csomagolásban heverő amerikai karotázserendezésbe, és elvégezte első lyukméréseit. Néhány Ωm és néhány ezer Ωm fajlagos ellenállású képződmények váltakoztak úgy, hogy Baturnak két különböző érzékenységekben kellett végigmérnie a lyukat: az egyik felvételen az alapvonalba simultak a jól vezető képződmények, és meg lehetett állapítani a nagy ellenállásúak valódi paramétereit, a másik esetben a jól vezetőkről jött információ, a nagy ellenállású törmeléknél pedig végkitérésbe ment a műszer. Amikor aztán behelyettesítettük az anizotrópiaképletbe a kapott valódi vastagság- és fajlagos ellenállásértékeket, rögtön 4,5–5 lett az eredmény – mindjárt megvolt a háromszoros mélységeltérés oka.

A harmadik meglepetés az volt, hogy a 45 nagy görbét a fent vázolt körülmények közepette kevesebb, mint másfél hónap alatt mértük le, ami nem sokkal maradt el az itthoni havi 40 egységnyi elvárt teljesítménytől. Persze, a szaharai terepen nem volt sem pénteki, sem szombat-vasárnapi szabadnap, hiszen mi a fenét csinálhattunk volna? Minden nap igyekeztünk, hogy minél előbb Tripoliban lehessünk.

Már több hónapja itthon voltunk mindnyájan, amikor megjött a líbiai fél véleménye a Draskovits Pál által készített és augusztusban leadott előzetes jelentésünkről. A véleményben tulajdonképpen csak apróságok voltak. Az utolsó mondat viszont az volt, hogy „A jelentés angolsága igen gyenge”. Ebbe az egyetlen rövid mondatkába viszont a líbiaiaknak nem kis teljesítménnyel sikerült három, igen súlyos nyelvtani hibát belegyömöszölniük. Ez a kritika persze nagyon bosszantott, többek között azért is, mert az egyik OVIBER-es hidrogeológus kolléga ugyancsak kint levő felesége angol tanár volt, és megkértem, hogy nyelvi szempontból nézze át és javítsa ki a művet. Aztán kiderült, hogy

minden rosszban van valami jó: talán ez a kritika (meg ahogy azt itthon lobogtattam) is hozzájárult, hogy két évvel később az ELGI beíratott egy hathetes intenzív angol nyelvtanfolyamra, amelynek végén sikeresen megszereztem a középfokú angol nyelvvizsgát.

A sok pozitívum mellett egy negatívum, amely nem is csak Líbiához kötődik: az ELGI geofizikusai a világban sok más helyen is megfordultak, a műszereink sehol nem hagytak cserben, a feladatokat szakmailag is mindig megfelelően, esetenként kiválóan oldottuk meg, a hazai árakból és munkabérekéből, akkori külföldi napidíjakból kiinduló árképzésünk alapján a világpiacra sehol sem voltunk drágák, de mindeme kiválóságunk dacára, lényegében soha nem sikerült az adott és jól befejezett munka folytatását megszerezni. Ez annál is szomorúbb volt, mert sok hozzánk ellátogató és a világban sokfelé sikeresen működő külföldi szakembert mi bizony szakmailag igencsak gyengécskének találtunk. Csak sovány vigasz lehet, hogy a világpiacra való be nem törésünknek biztosan nem szakmai okai voltak. Kereskedelmi nehézségek? Politikai okok? Ki tudja. És ma már talán nem is érdekes.

A végkifejlet

Végül, a geofizika teljesítette feladatát és mindenki haza is jöhetett, de a műszereket, felszereléseket nem hozhatták haza vám kifizetése nélkül. Ezért amit lehetett, eladtak (például a gépkocsikat).

Az ELGI végül is nem fizetett rá az „üzletre”, mert ami költsége felmerült, azt a NIKEX megtérítette, de egy fillér nyeresége sem lett rajta. Az OVIBER viszont, bár végül a líbiai fél kifizette az összes kutat, rettenetesen ráfizetett. Nekik egyszerűen nem volt olyan fűróberendezésük, amellyel az emberfejnyi törmelékből álló összletet, meg a repedezett mészköveket át lehetett volna fűrni. Mikor a kilátogató főnököket kérdeztük, hogy merték így elvállalni, arra a kormányzati elvárásra hivatkoztak, miszerint szerezzenek üzletet, majd az állam segíti őket. Megnyerték a tendert, és nem segített senki, nem szerepelt a téma az aktuális ötéves tervben. A kilenc hónapra vállalt munkát talán két év alatt tudták elvégezni, óriási kötbérrel, ráfizetéssel, a menet közben vásárolt harmadik fajta fűróberendezéssel. Amikor a bős-nagymarosi építkezéseket az OVIBER-nek kezdenie kellett, szanálták a céget, hogy nekifoghasson az új nagy feladatnak.

Kár, hogy az érdekes és eredményes geofizikai munkák mellett abban a korszakban sok ilyen lehetetlen körülmény árnyékolta be a szakmai sikereket.

Az ottani élet nem szakmai eseményei, érdekességei

Nemesi László tapasztalatai

– Először is az éghajlat. Míg februári kiérkezésünkkel éjjel-nappal, az utcán és a lakásban is 10–12 fok volt

- (kőpadló; szimpla üveg az ablakon, úgyhogy soha sehol nem fáztunk ennyit), addig április végén, május elején már a mérési területen déltájban, árnyékban 52 fokot mértünk. A talaj hőmérséklete 80 fok volt.
- Tripoliban a helybéliekkel jó kapcsolataink voltak, csak figyelmeztettek arra, hogy sötétben már ne menjünk az utcára. Az élelem kitűnő volt (mondjuk különösen Mongóliához viszonyítva). Például bábolnai grillcsirkét árultak mindenhol az éttermek, büfék. Szeszes ital persze nem volt, de abban a nagy melegben legfeljebb egy sör esett volna jól. A helybéliek viszont – ha csak teheték – kihágtak, mint Ozmin a Mozart-operában. A mi Tripoliban lévő lakásunk földszintjén egy rendőr lakott. Egyszer feljött hozzánk és pálinkát kért. Mondtuk, hogy nincs. Nem hitte. Minden szekrényt, rejtékhelyet megmutattunk, mire adott egy receptet, hogy narancsból, cukorral kell pár napig erjeszteni egy lét, amelybe porított élesztőt rakunk, majd desztilláljuk le, és jön megköszölni. Úgy is lett. Mi nem ittuk, ő elköszölgatta, majd átment a szomszédunkhoz, egy szerbhez, akivel a sört főzette „hígító-nak”.
 - A nők az utcán fehér lepedőbe burkolva jártak, és csak fél szemmel nézhetek ki, még autóvezetés közben is. Egy kocsiban férfi és nő csak akkor utazhatott együtt, ha házastársak voltak. Egy magyar kolléga felesége nem vette fel a férje nevét, ezért igazoltatásnál a rendőr kiszedte a kocsiból, és vitte volna a sítire, a férjnek pedig intett, hogy maga elmehet. Nagyon nehezen tudták igazolni magukat, és külön házassági papírokat szereztek be arab nyelven, hogy elkerüljék a bajt a továbbiakban.
 - Egy líbiainak négy felesége lehetett, de a lányt az apja csak egy kilogramm aranyért adta. Így aztán sok férfinak nem jutott egy se, soknak meg csak 30–40 éves korban. Az utcán férfi és nő nem mehetett egymás mellett. Így sok furcsaság is volt. Például egyszer voltunk moziban is, de a régebben kint dolgozók figyelmeztettek, hogy ha valaki a feleségét is vinné, a társaság előtte, mögötte, mellette vegye meg a jegyeket, mert amint besötétedik, a helybéliek megtámadják az idegen nőket (líbiai nő meg nem mehetett moziba).
 - Libiában nem loptak az emberek. Ezt azzal érték el, hogy a tolvajoknak levágták a kezét. Állítólag még abban az időben is, amikor mi kint tartózkodtunk. Igaz, már nem pallóssal, hanem a sebészeti klinikán. Egy biztos, nem nagyon zártak be semmit. Az utcán a gépkocsik ajtaja sem volt zárva. Ebből fakad az én érdekes esetem is. Tripoliban nem volt tömegközlekedés. Ezért a NIKEX-OVIBER Drilling Company is vett két teljesen egyforma Fiat személykocsit, és ezzel közlekedtünk a városközpontban lévő iroda és a mintegy tíz kilométerre lévő szálláshelyünk között. Egyik alkalommal én maradtam egyedül utolsónak az irodában. Kaptam egy slusszkulcsot az utcán álló gépkocsinhoz. Munkám végeztével mentem volna „haza”, de az egyik gumi lapos volt. Kereket kellett cserélnem. Nyitottam a csomagtartót a pótkerékért, de az is lyukas volt. Ott állt viszont mögöttem a másik ugyanolyan kocsi. Gondoltam, a többiek a környéken vásárol-

nak, azért nem vitték még el. Kinyitottam a csomagtartóját, abban jó volt a pótkerék is, hát kivettem, lecseréltem az enyémmel. Gondoltam, majd másnap megyünk a gumishoz. Hazaértem a szálláshelyre, hát ott állt a másik kocsink is. Kérdeztem, ki és mikor jött meg ezzel, merre jött, hogy tudott megelőzni? Kiderült, hogy már legalább egy órája mentek haza. Uram fia! Én egy ismeretlen ember ugyanolyan kocsijából loptam ki a pótkereket. Igaz, a lyukasat visszatettem.

- Munkaszüneti napokon kimehettünk a tengerpartra is, de csak a Tripolitól 20–30 km-re lévő szabadstrandhoz, ahol a líbiai rendőrök ügyeltek arra, hogy muzulmán nő le ne vetközzön. Ha mégis fürdeni akart a nagy hőségben, hát ruhástól ment a vízbe. A víz csodás volt, csak a nagy hőmérséklet-különbség miatt óriási tarajos hullámokkal kellett megküzdeni a part közelében. Mi, „jó úszók” ezért mélyen beúszunk, ahol még nem voltak tarajok. Csak egyszer az átlátszó, tiszta vízben, amerre csak elláttunk, mindenhol hemzsegték a cápák. Szerencsénkre nem voltak éhesek, de többet nem úsztunk be olyan távolra a parttól.

Draskovits Pál az alábbiakra emlékszik

- Amikor kijöttem a tripoli tranzitból és körülnéztem, ki vár rám, a kollégák azonnal nekem estek és alaposan leteremtettek. Ugyanis a nyakamban lógott a fényképezőgépem – nem tudtam, hogy Libiában nem nagyon volt szabad fényképezni, főleg nem a repülőtéren. Gyorsan beraktam a kézitáskámba, ezt megúsztam, nem lett belőle baj. A csomagomban lévő kolbász, szalámi és konyak is gond nélkül átjutott a személyi vámon. A baj a szállásunkon következett be: büszkén mutattam a kollégáknak, hogy a zürichi átszállásnál milyen ügyesen szereztem a repülőtéri bankban líbiai dinárt, a hivatalos árfolyamnak majd egyharmadáért. Erre a kollégák némi nevetés és káromkodás közepette fölvilágosítottak, hogy aznap lépett életbe a líbiai pénzreform, új pénzt dobtak forgalomba, a régivel már sehol nem lehet fizetni. Persze, kishíján rossz lettem, mert nem kevés pénzről volt szó. Aztán a társak segítségével ez is elintéződött: nagyon korlátozott mértékben (amely korlátozott mérték azonban a mi napi-díjunkhoz képest óriási volt) a bankban mindenki beválthatta a régi pénzt új dinárra, 1:1 arányban. (Ehhez tudni kell, hogy a dinár sem volt kemény valuta, az országból kivinni értelmetlen volt, mert csak nagyon rossz árfolyamon lehetett beváltani, országon belül viszont a jó árfolyamon csak nagyon korlátozott volt a beváltási lehetőség.)
- Ennek kapcsán új iparág jött létre, amely néhány hétig maradt életben: a bérsorbaállítás. A bankban, folyószámlán és hasonló helyeken lévő pénzzel nem volt semmi gond, csak az otthon tartott készpénzzel (meg a NIKEX-OVIBER Drilling Company pénztárával, mert a főnök, ki tudja miért, a pénzt nem a bankban tartotta, hanem a táskájában). Libiában nem kevés olyan gazdag ember volt, aki nem örült volna annak, ha az állam vagy a bank tudott volna a pénzéről, ezért azt otthon tartotta. Ő ennek csak

- a töredékét válthatta be, ezért némi aprópénzért fölbérelt egy csomó nincstelen koldust, akik néhány óras sorállás után beváltottak neki 100 vagy 150 dinárt, már elfelejtettem a korlát mértékét. Hogy ez mennyi? Összehasonlításként: aapidíjunk 7 dinár volt; a piacon 1 dinárért kaptunk egy közepes zsák narancsot, 20–25 (bábolnai) tojást vagy egy távol-keleti inget. Itt vezettük be az „interkontinentális ing” fogalmát: Ázsiában készült, Afrikában vetjük, Európában hordtuk.
- Ha már a pénznél tartunk, engem a NIKEX egyhaviapidíjjal bocsátott utamra, mondván, hogy gyorsan befejezitek a mérést, aztán úgyis hamarosan jöttök haza, elég lesz ennyi. Amikor már eltelt a második kinti hónapom is, kérdeztem a kinti NIKEX képviselőt, hogyan juthatnék egy kis pénzhez, merthogy a NIKEX már több mint egyhaviapidíjjal tartozik. Erre összesen annyit válaszolt: na, ez egy jó kérdés. Aztán következett egy kiselőadás, hogy az egyébként jogos és ésszerű kérésem teljesítése miért lehetetlen. Ismét megerősödtem abbéli hitemben, hogy a pénzemberek esze egészen más srófra jár, mint a (normális?) többieké. Ugyanakkor tartozom az igazságnak azzal, hogy hazaérkezésem után elszámoltam a NIKEX-ben, és a járandóságomat röpké két-három hónap alatt az utolsó fillérig (bocsánat, utolsó centig) átutalták a devizaszámlámra.
 - Most, amikor ezeket a sorokat írom, a Tisztiorvosi Szolgálat harmadfokú hőségriadót rendelt el itthon, mert a napi középhőmérséklet már több napja 27 °C fölött van, a napi csúcstérték pedig 32–36 °C. Nos, a három hónap alatt, amelyet Líbiában töltöttünk, egyszer sem volt ilyen „hűvös” (nyaranta ezzel a mondattal szoktam bosszantani az ismerőseimet). Ez az egész a NIKEX és az OVIBER, illetve a kettejük által létrehozott NIKEX-OVIBER Drilling Company tökéletlenkedéseinek következménye volt. Az elektromos méréseket március-április helyett június közepe és július vége között végeztük. A Szahara peremén. Örület. Ennyit a tapasztalt külkercegről és a helyi viszonyokat jól ismerő fűrés társaságról.
 - Nekünk Líbiába kellett utaznunk ahhoz, hogy a valóságban is megtapasztalhassuk Rejtő Jenő / P. Howard írói nagyságát. A tőle származó idézet esetünkben 100%-os valóság lett: „A hőség árnyékban 52 fok. De árnyék sehol.” Illetve volt árnyék: a lakókocsi alatt, ahová a min-max-hőmérőt tettük (és ahol tényleg pont 52 fok volt, árnyékban). Bár urasan éltünk, mert a lakókocsikba be volt vezetve a hálózati áram, és légkondicionáló berendezésünk is volt, de ebben a még ott sem mindennapos hőségben közel s távol mindenki bekapcsolta a légkondicionálást, aminek következtében előbb leesett a hálózati feszültség, legfeljebb 160 V-ra, aztán megszűnt az elektromos áram. Az áramszünet nem tartott sokáig – talán másfél napig, ami arra azért éppen elég volt, hogy a hűtőszekrényünk teljes tartalma tönkremenjen.
 - A három nyári hónapunk alatt 52 °C volt az átélt maximum. Ez nem sokkal maradt el a világatlaszokban feltüntetett valaha mért legmagasabb értéktől: 58 °C, a líbiai Al-Aziziában (ez volt 30 éve; hogy azóta mérték-e valahol melegebbet, nem tudom). Nos, Tripoliból a Wadi Abu Sheyba munkaterületünkre Al-Azizián keresztül vezetett az út. Elmondhatjuk tehát, hogy jártunk a Föld legmelegebb pontján. Bár azt hiszem, közelebb áll a valósághoz az alábbi megfogalmazás: a legmelegebb ponton azon pontok közül, ahol egyáltalán volt hőmérő.
 - Május közepén, amikor kiérkeztem Tripolibá, napközben 35 fokot mutatott a hőmérő. Mi tagadás, elég melegem volt. De nem mindenkinek: a helyi munkaerőpiacon láttam egy felfogadásra váró négyt vádlíközépig érő vastag, fekete, végig begombolt télikabátban, sálban-sapkában-kesztyűben. A koma szinte vacogott, nekem meg az izzadság csurgott a hátamon. Fantasztikus egy látvány volt.
 - A középiskolában persze tanultuk, mi az a *wadi*, a sivatagos vidékeken az időszakos folyók függőleges vagy legálábbis meredek falú völgye. De mennyire más volt ezt a saját szemünkkel is látni! A wadi fala jóval magasabb volt, mint egy ember. És azt is érdekes volt megtapasztalni, hogy a wadi fölé nem hidat építenek, hanem a két oldalán egy-egy enyhén lejtős le- és feljárót (bár hasonlóra itthon is akad példa). Egy érdekességet viszont nem láthattunk, csak Batur levelében olvastuk hónapokkal később: egy őszi heves zápor során a wadi színültig megtelt vízzel. Ilyenkor persze nincs közlekedés. Két nap múlva viszont nyoma sem volt a korábbi legalább három méteres víznek.
 - Itthon sok rosszat mondanak a líbiaiak bigott muzulmán-ságáról. Ezek jó része igaz, de azért megszívleendő, amit az egyik ottani ismerős mondott: „Nagyon jól tudjuk, hogy nektek, európaiaknak a vallásokat nem tiltja se a disznóhúst, se az alkoholt. Egyetek-igyatok, amit akartok, de lehetőleg otthon. És nagyon nem szeretjük, amikor részegen tántorogtok az utcán, balesetet, botrányt okoztok vagy molesztáljátok az arab lányokat.” Hát erre nem nagyon lehet mit válaszolni, inkább csak megfogadni. És hát ha valami nem hiányzott abban az iszonyú hőségben, hát az az alkohol, főleg a rövidital. Egy hűtött sör, az más, de ehhez csak egyszer volt szerencsénk, akkor is az alkoholmentes fajtájához. Viszont hideg volt, és nagyon jólesett.
 - A három hónap alatt azt hiszem, összesen két ízben voltam a tengerparton. Hogy miért? A „strand” annyi volt,



A wadi, a terület országútja



Leptis Magna romjai

hogy homok meg víz. Persze, vittünk magunkkal hűtőládában enni-, meg innivalót, de az az igazság, hogy fáradtabban értem haza, mint ahogyan kimentem. Trikót, sapkát húztam magamra, de a napsütés akkor is igen fárasztó volt. És nem a vállam-fejem-karom égett le, hanem a lábfejem: az volt a napnak legjobban kitett vízszintes felület.

- Líbia nincs olyan messze, hogy ne találkoztunk volna az ókori Római Birodalom emlékeivel. A terepi munkát befejezván egyik pénteken elrándultunk a Tripolitól vagy 100 km-re levő, Leptis Magna nevű római romvárosba (mai nevén Al-Khums). Ez a romváros ma már az UNESCO világörökség része. Azt hiszem, akkor még nem is létezett ez a világörökség kategória. Volt valami hitvány drótkerítés, meg egy arab őr, akinek kellett fizetni némi belépődíjfelét, de aztán már semmi zavaró körülmény nem volt. A terepi heteket leszámítva ez volt az



Leptis Magna színháza

egyetlen alkalom Líbiában, amikor zavartalanul csattogtathattuk a fényképezőgépet. Volt mit megörökíteni. Csofodálatos épületmaradványok voltak, olyasmi, mint amelyeket Jordániától Marokkóig több helyen is látni lehet. Már akkor is azon töprengtem, hogy a kétezer évvel ezelőtti technikával hogy tudtak egy ekkora világbirodalmat létrehozni és azt évszázadokon keresztül működtetni. Az egyik legcsodálatosabb fényképemen az ókori színház vakítóan fehér márványoszlopai között kéklik a Földközi-tenger.

A szerzők köszönetüket fejezik ki Verő Lászlónak és Zsille Antalnak, akik a szokásos lektori munkákon túl segítettek az emlékek felidézésében, és értékes tanácsaikkal láttak el olyan esetekben, amikor egy geofizikai módszer specialista szakzsargonát tették minden geofizikus számára érthetővé.

Földtudományi alapszakos, geofizikus- és környezetgeofizikusmérnök-hallgatók diplomavédése

A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén 2010. június 9-én sikeres államvizsgát tettek a műszaki földtudományi alapszak földtudományi szakirány, a műszaki földtudományi szak geofizikusmérnöki és a környezetmérnöki szak környezetgeofizikus-mérnöki szakirány végzős hallgatói. A három szakirányhoz kijelölt államvizsga-bizottságok munkájában *dr. Bodoky Tamás* egyetemi magántanár, *dr. Fancsik Tamás* igazgató és *dr. Farkas István* címzetes egyetemi tanár vett részt a miskolci egyetemi oktatók mellett.

A műszaki földtudományi alapszak (BSc) földtudományi szakirányán a képzés csupán négy éve indult el a bolognai folyamat jegyében. Földtudományi mérnökként *Szabó Erika Angyalka* végzett, szakdolgozatának címe „Sékélyreflexiós szeizmikus módszer” volt. Ugyanakkor a másik két szakirányon az öt éves, immár hagyományos képzésnek számító oktatás befejeződött. Több mint 60 éves múltra tekint vissza a (soproni-) miskolci geofizikusmérnökök képzése: az első oklevelet ezen szakon 1953-ban állították ki. A képzés korszerűsödése és a diploma megnevezésének változása mellett 1953 óta több mint 400-an szereztek a geofizikusmérnöki szakirányon vagy ágazaton oklevelet a bányageológus végzettségű, de geofizikai munkakörben elhelyezkedett mérnökökkel együtt. Ebben az évben utoljára

három hallgatónk védte meg diplomatervét és tett eredményes záróvizsgát. *Bulla Dávid* „A mélyfűrészi geofizikai módszerek alkalmazása meghibásodott víztermelő kutak vizsgálatában” c. diplomatervének *Rőcsei Zsolt* (Geoservice Kft.), *Jánkfalvi Attila* „A mélyfűrészi geofizikai szelvényértékelés válaszegyenleteinek elemzése” c. dolgozatának *dr. Kiss Bertalan* (Mol Nyrt.), míg *Szűcs Adrienn* „A hazai és nemzetközi olajipar nyitott fűrólyukas mélyfűrészi geofizikai eszközeinek és szolgáltatásainak elemzése” c. diplomamunkájának ipari konzulense *Bock János* (GEOINFORM Kft.) volt. A környezetgeofizikus-mérnöki védésen szintén nemcsak érdekes, hanem ugyancsak aktuális diplomatervtémák szerepeltek. Ezen a szakirányon az első oklevelet 1998-ban állították ki, az ez évi tízzel együtt, összesen 51 eredményes védés volt a miskolci környezetgeofizikus-mérnöki szakirányon. *Danyikó Viktória* „Magyarországi autópálya-építések környezetgeofizikai szempontjai” c. diplomatervének *Juhász Zsolt* (Strabag Zrt.), *Deák Zsuzsa Villő* „Felszínmozgások okainak vizsgálata földtani, vízföldtani és geofizikai módszerekkel” c. diplomatervének *Füsi Balázs* (ELGI), *Csorba Evelin* „Szivárgási tényező meghatározási lehetőségei és korlátai a hazai vízkutatási gyakorlatban” c. diplomatervének külső konzulense *Erdélyi Barna* (Geoser-



A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékének hallgatói a sikeres diplomavédés után. Balról jobbra: Bulla Dávid, Jánkfalvi Attila, Szűcs Adrienn, Okszimecz Krisztina, Deák Zsuzsa Villő, Tolnai Éva Eszter, Hasilló Gergely, Nagy Péter, Kormos Katalin, Zelei Mónika, Csorba Evelin, Szabó Erika Angyalka, Danyikó Viktória, Sereg István (A képet dr. Ormos Tamás készítette)

vice Kft.) volt. A diplomamunkák között két archeogeofizikai témájú is szerepelt: *Hasilló Gergely* a geofizikai módszerek régészeti alkalmazásait elemezte, és ismertette a bükkszent-lászlói továbbá cserépváraljai kutatások eredményeit. *Nagy Péter* az elektromos és mágneses geofizikai módszerek archeogeofizikai alkalmazását mutatta be pusztataksanyi és pásztói példákon keresztül, az ő külső konzulense a szolnoki Damjanich János Múzeumban dolgozó *dr. Madaras László* volt. *Kormos Katalin* diplomatervének a címe „Geotermikus kutatás geofizikai vonatkozásai”, esetében *Kerbolt Tamás* (Geoservice Kft.) és *Pataki András* (Geokomplex Kft.) voltak az ipari konzulensek. *Okszimec Krisztina* dolgozata a fűróiszapok mélyfűrészi geofizikai szelvényekre és a környezetre gyakorolt hatásával foglalkozott, *dr. Kiss Bertalan* (Mol Nyrt.) és *dr. Dormán József* (Mol Nyrt.) külső konzulensek segítették munkáját. *Sereg István* „Az Ároktő-Tiszadorogma távlati vízbázis geofizikai vizsgálata szárazföldön és a Tisza folyón” c. dolgozatának külsős konzulense *B. Szabó László* (Háromkő Bt.) volt. *Tolnai Éva*

Eszter „Kommunális hulladéklerakók zárószigetelésének vízháztartási vizsgálata” c. dolgozatát angol nyelven írta meg, s kiváló minősítéssel szerzett oklevelet. *Zelei Mónika* diplomamunkájának a címe „Budapesti Vegyiművek környezetében eltemetett folyómeder geofizikai vizsgálata”, az ő külső konzulense *Magyar Balázs* (ELGOSCAR 2000) volt.

A 2010-es diplomaterv témák jól tükrözik a Geofizikai Tanszék azon törekvését, hogy a dolgozatok témái minél szélesebb spektrumot fedjenek le, másrészt alkalmazott geofizikai vagy környezetmérnöki szempontból aktuálisak legyenek. A Geofizikai Tanszék ezúton is köszöni nemcsak a konzulensek, hanem a bírálók munkáját is, melyek együttesen járultak hozzá a védés szakmai színvonalának emeléséhez. A hagyományos ötéves képzés befejezését követően az alap- (BSc-) és a mester- (MSc-) képzés színvonalas bevezetése jelent új oktatási feladatot az egyetemi oktatásban.

Pethő Gábor

Steiner Ferenc 1932–2010

„A jó harcot megharcoltam, a pályát végigfutottam, a hitet megtartottam...” Szent Pál apostol szavait veszem kölcsön, amelyek oly találóan illenek *Dr. Steiner Ferenc* professzor úrra, akit 2010. július 1-én szólított váratlanul magához a Teremtő.

Tisztelt gyászoló Család!

Kedves Kollegák, Tanítványok, Barátok!

Szomorú kötelesség gyűjtött bennünket össze, hogy végső búcsút vegyünk *Dr. Steiner Ferenc* professzor úrtól, a Miskolci Egyetem emeritus professzorától, a Geofizikai Tanszék egykori tanszékvezetőjétől, a vérbeli tudóstól, a kiváló tanártól és pedagógustól, kollégánktól, kedves Feri Bátyánktól.

Sikeres szakmai pályája teljes egészében egyetemünkhöz, tanszékünkhöz kötődik. A Geofizikai Tanszék volt első és egyben utolsó munkahelye is. A munkában fáradhatatlan volt, a tudományos igazság keresésében és annak megismerésében végtelenül precíz. Rendületlenül hitt a kitűzött céljai elérésében. A hozzávezető út azonban nem volt mindig simára kikövezve számára. Pályája végigfutásával járó harcait azonban sikerrel vívta meg. Június utolsó napjaiban kórházi ágyán is még szakmai problémák megoldásán vitakoztunk jó kedvűen, eszünkbe se jutott a közeli vég lehetősége.

Igazi tanár volt. Nem csupán azért, mert a megszerzett tudását azonnal továbbadta, hanem azért is, mert egyúttal nevelt is. Nevelt példamutatásával, nevelt széles körű, halhatatlan műveltségével. Magam is tanítványai közé tartozom, emlékeimben öröm hallgatóként, majd asszisztensként a Tőle kapott atyai tanácsokat.

78 éve, 1932. július 12-én született Sopronban, polgári családban. A patinás soproni evangélikus Líceum elvégzését követően a Szegedi Tudományegyetemen fizikát és matematikát tanult. A korán megmutakozó tehetsége és a tudomány iránti elkötelezettsége okán még hallgatóként Budó Ágoston professzor úr vette maga mellé demonstrátorként a Kísérleti Fizikai Intézetben. 1954-ben a Sopronban frissen megalapított Geofizikai Tanszéken lett tanársegéd a tanszékalapító Kántás professzor mellett. Azóta megszakítás nélkül egészen haláláig a tanszék aktív munkatársa volt.



Dr. Steiner Ferenc
1932–2010

A Geofizikai Tanszék Miskolcra való átköltözését követően védte meg egyetemi doktori disszertációját 1963-ban, majd 1966-ban kandidátusi fokozatot szerzett. 1975-ben intenzív szakmai vitában megvédte téziseit, és ezzel elnyerte az akadémiai doktori fokozatot. 1977 óta egyetemi tanár, nyugállományba vonuláskor oktatói-kutatói munkásságának elismerésül a Miskolci Egyetem professzor emeritus címet adományozott számára.

Nyolc éven keresztül, 1991 és 1997 között vezette a tanszéket. Ehhez az időszakhoz kapcsolódik két új – a geoinformatika és a környezetgeofizika – szakirány elindítása. Sajnos a sikeres környezetgeofizika szakirány a közelmúltban a bolognai folyamat áldozata lett. Ebben az időszakban azonban nagyon nehéz feladatok is osztályrészül jutottak számára. A „Bokros-csomag” néven immár a közelmúlt történelmébe bevonult megszorító intézkedések következtében a tanszék személyi állományának több mint egyharmadát volt kénytelen elveszíteni. Ennek következményeit mind a mai napig viseljük.

Érdeklődése és szakmai-tudományos tevékenysége szerteágazó volt. Kezdetben a gravitáció, a mágnesség, a radiológia és a geotermia területén kutatott és ért el eredményeket. Különösen a gravitációs módszerek kutatásában volt sikeres. Nevéhez fűződik a lokális és regionális hatások szétválasztási eljárásainak fejlesztése, valamint számos, különböző célú gravitációs térkép szűrési módszerének kidolgozása. Az alkalmazott tudomány és fejlesztés sem állt távol tőle. Többek között radioaktív módszereket fejlesztett ki a szén minőségének meghatározására, amelyek a gyakorlati felhasználásig is eljutottak. Vezetésével radioaktív mérő- és automatikus minősítő rendszert dolgozott ki a tanszék, amellyel szállítás közben, már a bányában is elkülöníthetővé vált a meddő a széntől, akár szalagon, akár csillében szállították azt.

Kutatói munkássága második periódusában érdeklődése a statisztika irányába fordult. A geofizikai – és nem csak geofizikai – méréseket terhelő elkerülhetetlen hibák és bizonytalanságok hatását és befolyását kutatta a mérési eredmények kiértékelésre és értelmezésére vonatkozóan. Matematikusi-fizikusi képzettségére alapozva számos korszakos eredményt ért el munkatársaival a modern optimalizációs módszerek területén különböző robusztus, rezisztens mód-

szerek kidolgozásával. Ezek közül is a leggyakoribb értékek módszerét ragadom ki, amely a tanszékünk geofizikai inverziós iskolájában és nemzetközi együttműködésben nagyon sok kifejlesztett módszer és program szerves részévé vált.

Tudományos munkásságát több száz publikációban, négy könyvben és egy monográfiában – döntő részben német és angol nyelven – foglalta össze kutatótársaival. A tanszéki kollegáin kívül hazánk szinte valamennyi szakterületi kutatóintézetében és kutatóhelyén voltak vele aktívan együttműködő kutatók.

Egyetemi oktatóként sok és széles körű feladatot vállalt. Kezdetől fogva, egészen a legutóbbi időkig a Föld fizikája c. tárgyat tanította. Kezdetben a gravitáció és mágnesség, majd az utóbbi időkben a geostatisztika és geoinformatika szakterületein tartott magas színvonalú előadásokat a Miskolci Egyetem Bányamérnöki, majd később a Műszaki Földtudományi Kar szinte valamennyi hallgatója, illetőleg doktoranduszai számára. Előadásainak anyaga hat egyetemi jegyzetet ölelt fel.

Minden idejét a tudományos kutatómunkának és az oktatásnak, valamint családjának szentelte, amelyek teljesen kitöltötték életét. A közéletre, közszereplésre nem sok energiája jutott. Nem is vágyott erre – sem a zajos sikerekre, sem a bürokráciával való értelmetlen küzdelemre –, ez nem az ő világa volt. A Magyar Tudományos Akadémia Geofizikai Tudományos Bizottságának munkájában azonban szívesen és aktívan vett részt.

Sikeres életművét számos kitüntetéssel ismerte el a szakmai közösség. Az Oktatásügy Kiváló Dolgozója, a Munka Érdemrend bronz fokozata, a Magyar Geofizikusok Egyesületének Egyed László Emlékérme és Tiszteleti tagsága elismerések mellett különösen büszke volt Akadémiai díjára, amelyet a leggyakoribb értékekről írt könyvéért kapott 1991-ben, valamint a Köztársasági Elnöki Ezüstéremre,

amelyet a Magyar Köztársaság elnökétől személyesen vehetett át 1999-ben.

Kivételes műveltségű ember volt. Az irodalmat és főleg a komoly zenét szenvedélyesen szerette, és művelte is. Koncertélményeit rendszeresen és lelkesen megosztotta velünk, tanszéki kollegákkal. Szépen zongorázott, barátaival rendszeresen adtak kamarakonzerteket saját örömükre, saját lakásukon. A műveltségéhez kifinomult intellektuális humorérzéke is társult. Tanszékünkön szinte szállóigévé vált egy borkóstolás alkalmával elhangzott megjegyzése, amellyel a pince egyik asztalát a matematikai analízis módszerével minősítette. Jóízű nevetése többé már nem hallatszik a tanszéki folyosón...

Tisztelt Steiner professzor úr! Kedves Feri Bátyánk!

A jó harcot megharcoltad, a pályádat végigfutottad, a hitet megtartottad. Fáradozásaid eredményei maradandóak: átadott tudásod és élettapasztalatod tanítványaidban, geofizikusmérnökök nemzedékeiben él tovább. Tudományos felismeréseid, kutatásaid eredményei publikációid sokaságában a jövő tudományos tárházának időt álló értékei.

A Miskolci Egyetem Szenátusa, a Műszaki Földtudományi Kar Tanácsa a Geofizikai Tanszék munkatársai, valamint tanítványaid és a geofizikusok közössége nevében most elbúcsúzom Tőled. Életed példa előttünk – művedet folytatjuk. Emlékedet kegyelettel megőrizzük.

Kedves Feri Bátyánk! Isten Veled!

Ormos Tamás

(Az itt közreadott megemlékezés Steiner Ferenc professzor úr temetésén, 2010. július 30-án Miskolcon, a Szentpéteri kapui temetőben hangzott el.)

Beslényi Klára

1942 – 2010

2010. május 4-én vettünk búcsút a Rákoskeresztúri új köztemetőben szeretett munkatársunktól, *Beslényi Klárától*. Eltávozása megérdemelten csendes és békés volt, úgy, ahogyan élt. 1942. december 1-én született Budapesten. Tanulmányainak elvégzése és a gyakorlati idő letöltése után 1965-ben a Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet Observatóriumi Osztályára került. Az intézetnek ez a részlege akkor még a Damjanich utcában működött, ahol rendkívül jó közösségi szellem uralkodott, így könnyen beilleszkedett az osztály életébe. Feladata volt a Tihanyi Földmágnesees Observatórium földmágnesees regisztrátumaiból az óraátlagok kiolvasása és táblázatba foglalása, ami rendkívüli precizitást igényelt. Munkáját lelkiismeretesen, a megkívánt pontossággal, gondosan és megbízhatóan végezte. Életét József Attila halhatatlan sorai vezérelték:

„... dolgozni csak pontosan, szépen,
ahogy a csillag megy az égen,
úgy érdemes.”

E sorok szellemében élt és dolgozott. 1970-ben a Geofizikai Intézet az új székházába költözött és itt az Observatóriumi Osztály mint Földfizikai Osztály folytatta munkáját. Ettől kezdve szakmai munkája mellett az osztály adminisztratív munkáját is el kellett látnia, amelyet ugyancsak a tőle megszokott színvonalon végzett, munkatársai teljes megelégedésére. Egy munkát sem adott ki a kezéből addig, amíg azt hibátlanak nem találta.

1994-ben nyugalomba vonult, de rész-munkaidőben továbbra is szívesen vállalt feladatokat. Ekkor már a legtöbb munkát számítógéppel kellett végezni; ezt is könnyen és szívesen megtanulta. A földmágneseesévkönyvek és fotoregistrátumok digitalizálását végezte nagy lelkesedéssel és megbízhatósággal.

Nem felejtjük el csendes humorát, mindig célba találó megjegyzéseit. Megőrizük emlékezetünkben kedvességét, segítőkészségét, szerény és szeretetre méltó lényét.

Kedves Klárikánk, nyugodj békében!

A Földfizikai Főosztály munkatársai nevében:

Aczél Etelka



Beslényi Klára
1942–2010

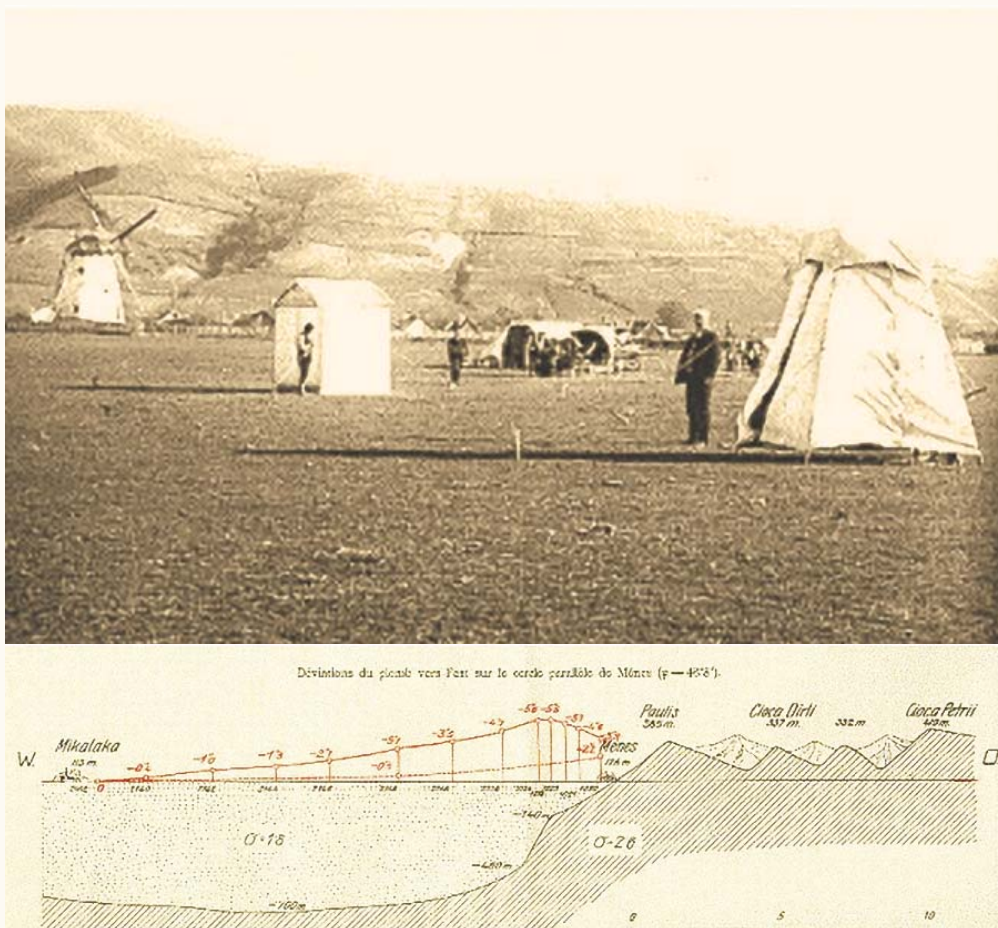
Rendezvénytár

2010. október		
2010. okt. 17–22.	SEG 80. évi kongresszus és kiállítás (http://www.seg.org)	Denver, USA
2010. okt. 20.	„Új utak a földtudományban” előadás-sorozat: „Éghajlat – kőbe vésett magnószalag”	Budapest, ELGI konferenciaterem
2010. november		
2010. nov. 17.	„Új utak a földtudományban” előadás-sorozat: „Föld és egészség”	Budapest, ELGI konferenciaterem
2010. nov. 17–19.	„Bányászat és geotermia” konferencia	Eger, Hotel Eger
2010. nov. 18.	IX. Geotudományi Ankét	Nagykanizsa, Hevesi Sándor konf.terem
2010. december		
2010. dec. 15.	„Új utak a földtudományban” előadás-sorozat: „Óriásvárosok – mélyebbre hatolni, biztonságosabban építkezni”	Budapest, ELGI konferenciaterem
2011. január		
2011. jan. 16–19.	EAGE Mélyfúrás-geofizikai Workshop (http://www.eage.org)	Isztambul, Törökország
2011. március		
2011. márc. 27–30.	EAGE 3. Passzív Szeizmikus Workshop (http://www.eage.org)	Athén, Görögország
2011. április		
2011. ápr. 3–8.	European Geoscience Union közgyűlése (http://meetings.copernicus.org/egu2011)	Bécs, Ausztria
2011. ápr. 10–13.	AAPG évi kongresszus és kiállítás (http://www.aapg.org)	Houston, USA
2011. ápr. 12–14.	EAGE IOR 2011 (http://www.eage.org)	Cambridge, Nagy-Britannia
2011. május		
2011. máj. 23–26.	EAGE, 73. évi kongresszus és műszerkiállítás (http://www.eage.org)	Bécs, Ausztria
2011. szeptember		
2011. szept. 12–14.	EAGE Near Surface 2011 (http://www.eage.org)	Leicester, Nagy-Britannia
2011. szept. 18–23.	SEG 81. évi kongresszus és kiállítás (http://www.seg.org)	San Antonio, USA
2011. október		
2011. okt. 4–7.	A Balkán Geofizikai Társaság 6. kongresszusa (http://www.bgs2011.eu , http://www.bgs2011.hu)	Tulip Inn Hotel, Budapest

EAGE: European Association of Geoscientists and Engineers; *SEG*: Society of Exploration Geophysicists; *AAPG*: American Association of Petroleum Engineers

További részletek, referenciák a honlapról (<http://www.mageof.hu>) érhetők el.

Kakas Kristóf



Tisztelt Kollégák!

Lapunk hátsó borítója általában üres. Ide a jövőben képeket szeretnénk tenni. Gondolom, nemcsak Eötvös Loránd fényképezte a terepi méréseket, hanem azóta egyesületünk tagjainál is sok érdekes kép halmozódott fel. Szerkesztőségünk hálásan fogadná, ha érdekes képeikből a lap hátsó borítóján történő megjelentetésre minél többet elküldenének nekünk.

Képeiket várva kíván „Jó szerencsét!”
Bodoky Tamás főszerkesztő

